

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie électrique et de génie informatique

Contrôle du gauchissement du laminé  
organique lors de l'assemblage à une puce  
électronique renversée à l'aide d'adhésif  
temporaire

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie électrique

Normand-Pierre Goodhue

Sherbrooke (Québec) Canada

Novembre 2018



# MEMBRES DU JURY

David Danovitch

---

Directeur

Julien Sylvestre

---

Évaluateur





# RÉSUMÉ

L'assemblage par thermocompression (TCB) est présentement la technique de choix pour promouvoir la planéité de l'assemblage pendant l'étape critique du brasage à la puce électronique, mais le débit de production en est grandement affecté. Ceci induit une augmentation des coûts par pièces et du capital d'investissement, lorsque comparé à la technique traditionnelle d'assemblage de masse par fournaise. Ces limitations encouragent donc le développement d'une technique compatible à un environnement de production de masse. Basé sur l'usage d'adhésifs temporaires utilisés dans l'industrie de l'amincissement des tranches de silicium et dans l'intégration 3D, le présent projet étudie la possibilité d'utiliser une approche similaire pour contrôler le gauchissement de substrat organique lors des étapes d'assemblage d'un procédé à puce renversée.

Dans cette étude, plusieurs types de substrats organiques sont caractérisés par leur gauchissement en fonction de la température, mais aussi en fonction de la force nécessaire pour les maintenir plats. Ceci est accompli à l'aide d'une nouvelle adaptation d'un montage Shadow-Moiré pour la mesure hors plan de substrat organique. Un cœur plus épais permet certainement une réduction du gauchissement, mais un cœur plus mince réduit les forces nécessaires à l'aplanissement du laminé lors d'une excursion en température.

Parmi les matériaux disponibles pour le collage temporaire de tranches de silicium, seule une faible quantité d'adhésifs sont compatibles avec les paramètres et le volume de production d'un procédé d'assemblage à puce renversée. Les adhésifs les mieux classés sont optimisés quant à leur étalement, leur cuisson, leur stabilité mécanique et leur dissolution. D'égale importance à la sélection des adhésifs, le support temporaire nécessite un matériau au coefficient d'expansion thermique similaire au substrat organique et dont son usinabilité, sa rigidité et sa compatibilité à un environnement en fournaise sont adéquates. Les combinaisons d'adhésifs et support temporaire sont comparées au gauchissement naturel d'un laminé organique lors d'une simulation de brasage à une puce renversée à l'aide d'un montage Shadow-Moiré. Seuls deux adhésifs combinés à une plaque d'aluminium ont pu maintenir adéquatement le gauchissement des laminés tout au long de l'excursion en température.

Les matériaux sélectionnés sont intégrés à un processus d'assemblage à large puce renversée puis caractérisés et comparés à un processus d'assemblage de référence sans adhésif ni support temporaire. Des résultats quant à l'inspection visuelle, la mesure non destructive de hauteur des interconnexions et coupes transversales sont présentés.

Les résultats de cette investigation suggèrent qu'une combinaison appropriée d'adhésif et support temporaire parvient à contrôler efficacement le gauchissement à travers un processus d'assemblage à puce renversée. Des pistes d'intégration de cette technique à un environnement de production à haut volume sont discutées.

**Mots-clés :** Substrat organique, puce renversée, adhésif temporaire, support temporaire, contrôle du gauchissement



À Michèle pour sa manière de voir le bon côté  
des choses.



# REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a pu être réalisé en raison de plusieurs personnes et plusieurs institutions. Bien que dirigées par mes liaisons IBM, Benoit Papineau et Eric Duchesne, mon directeur de recherche, David Danovitch, et moi-même, plusieurs étapes du projet nécessitaient l'aide, le savoir-faire et les connaissances de plusieurs autres personnes du C2MI, du 3IT et de IBM-Bromont.

Tout d'abord, je tiens à remercier Eric Duchesne et Benoit Papineau qui ont apporté un excellent encadrement pour ce projet de recherche. Cela a permis de créer un projet complet, bien justifié et digne d'être présenté dans une des plus grandes conférences sur les composantes électroniques. Quant à David, lorsqu'un défi se présentait, son expérience a toujours permis d'identifier la bonne piste de solution et la bonne personne à contacter pour son expertise dans les domaines nécessaires. J'apprécie grandement la confiance qu'il a eue en moi et la collaboration que j'ai eue avec lui.

Une aide particulièrement soutenue est provenue de deux techniciens du C2MI, soit Pierre Beaulieu et Patrice Tremblay. Ils m'ont formé sur plusieurs appareils et cela m'a permis de rapidement m'initier au domaine de l'encapsulation microélectronique. Excellents dans leur métier, ils ont aussi pris grand plaisir à m'aider à réaliser mon projet de recherche. Plusieurs autres personnes du C2MI, telles que Nathalie Meunier, Serge Martel, Edgar Tremblay et Danielle Maheu, m'ont aussi permis de compléter plusieurs parties importantes de mon projet de recherche.

Plusieurs personnes du 3IT m'ont aidé à réaliser mes différentes tâches à chaque fois que je me déplaçais à Sherbrooke, soit René Labrecque, Denis Pellé et Guillaume Bertrand en me fournissant le matériel nécessaire, ou en me guidant sur les bonnes formations spécifiques à mes demandes.

De plus, les simulations numériques ont pu être réalisées grâce à Papa Momar Souare qui a rapidement fait les ajustements dans le système Frisky afin de l'adapter aux particularités de mon projet de recherche.

En outre, il n'aurait pas été possible de réaliser ce projet sans le financement de l'Université de Sherbrooke, IBM, le CRSNG, Prompt et le C2MI.

Prendre un instant pour dire merci à tous ceux qui m'ont permis de réaliser mon projet de recherche est la moindre des choses.

Merci.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte et problématique . . . . .	1
1.2	Définition du projet de recherche . . . . .	4
1.3	Plan du document . . . . .	5
<b>2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>7</b>
2.1	Construction d'un laminé organique . . . . .	7
2.2	Défauts et problèmes causés par le gauchissement . . . . .	13
2.3	Techniques de contrôle du gauchissement des laminés pendant l'assemblage à la puce électronique . . . . .	15
2.4	Contrôle du gauchissement par adhésif et support temporaire . . . . .	21
2.4.1	Inspiration pour le contrôle du gauchissement de laminés du présent projet . . . . .	21
2.4.2	Travaux antérieurs sur adhésifs et supports temporaires dans le bra- sage des laminés . . . . .	24
2.4.3	Les différentes familles d'adhésifs . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Développement du concept d'assemblage</b>	<b>33</b>
3.1	Évaluation de la force de contrôle du gauchissement des laminés . . . . .	34
3.1.1	Dissolution des <i>chip bumps</i> des laminés . . . . .	34
3.1.2	Instron . . . . .	36
3.1.3	TherMoiré . . . . .	37
3.2	Identification des adhésifs . . . . .	44
3.3	Identification, design et construction des supports temporaires . . . . .	45
3.4	Technique d'étalement des adhésifs . . . . .	51
3.4.1	Étalement par vaporisation . . . . .	52
3.4.2	Étalement par aiguille de précision Nordson . . . . .	53
3.4.3	Étalement par tournette . . . . .	56
3.5	Processus de cuisson et collage de laminés aux supports temporaires . . . . .	59
3.5.1	Cuisson et collage du BB305 . . . . .	65
3.5.2	Cuisson et collage du HD3007 . . . . .	68
3.6	Évaluation mécanique des adhésifs . . . . .	72
3.7	Processus de décolage des adhésifs . . . . .	75
3.7.1	Décolage du BB305 . . . . .	76
3.7.2	Décolage du HD3007 . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Évaluation du contrôle du gauchissement</b>	<b>81</b>
4.1	Simulations du gauchissement à l'aide d'éléments finis . . . . .	81
4.2	Évaluation du contrôle du gauchissement des laminés par l'usage d'adhésif et support temporaire . . . . .	88
4.2.1	Adhésif BB305 . . . . .	88

4.2.2	Adhésif HD3007 . . . . .	90
4.3	Assemblage complet d'un laminé à la puce électronique à l'aide de la solution d'adhésif temporaire . . . . .	93
4.3.1	Gauchissement du site de brasure . . . . .	97
4.3.2	Gauchissement du laminé . . . . .	99
4.3.3	Décollage des laminés . . . . .	101
4.3.4	Pose du BGA . . . . .	103
4.3.5	Coupe transversale des assemblages complets . . . . .	106
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>115</b>
5.1	Sommaire du projet . . . . .	115
5.2	Contributions originales . . . . .	117
5.3	Travaux futurs . . . . .	119
	<b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b>	<b>123</b>

---



# LISTE DES FIGURES

1.1	Schéma d'une puce renversée connectée à son substrat organique . . . . .	2
1.2	Puce électronique connectée par microcâbles . . . . .	2
1.3	Étapes critiques du processus d'assemblage par brasage conventionnel . . .	3
1.4	Capot posé sur l'assemblage ayant une couche de pâte thermique entre la puce électronique et le capot. . . . .	3
1.5	Billes posées sous l'assemblage pour communication à la carte-mère d'un système informatique. . . . .	3
2.1	Tendance technologique des assemblages de puce électronique au fil des années	8
2.2	Procédé de conception d'un laminé avec cœur . . . . .	9
2.3	CET des cœurs de laminés . . . . .	9
2.4	Schéma d'un laminé et son empilement de couches . . . . .	10
2.5	Dépôt du cuivre par processus semi-additif . . . . .	11
2.6	Gauchissement moyen de différents laminés selon l'épaisseur de leur cœur .	13
2.7	Représentation de <i>white bumps</i> . . . . .	14
2.8	Pont entre les joints reliant le laminé à la puce électronique . . . . .	14
2.9	Micro-bille entre les joints de la puce électronique et du laminé . . . . .	15
2.10	Joint partiel ou ouvert entre la puce électronique et le laminé . . . . .	15
2.11	Schéma représentatif d'une disposition de raidisseurs . . . . .	16
2.12	Principe de fonctionnement des micro-ondes à fréquence variable . . . . .	16
2.13	Schéma présentant le principe de brasage à l'aide d'un laser . . . . .	16
2.14	Schéma d'une solution de contrôle du gauchissement par pression sous-vide	18
2.15	Schéma du fonctionnement d'un brasage par thermo-compression et par chauffage différentiel . . . . .	19
2.16	Mauvais alignement de joints de brasure . . . . .	19
2.17	Schéma de la préparation des plots d'interconnexions à angle . . . . .	19
2.18	Circuits imprimés courbés . . . . .	20
2.19	Gauchissement d'un laminé selon sa répartition de cuivre dans ses différentes couches . . . . .	21
2.20	Principe d'installation d'un support temporaire pour tranche de silicium .	22
2.21	Arrangement de puce en 3D avec différentes longueurs de TSV . . . . .	23
2.22	Conception de TSV avec amincissement de tranche de silicium . . . . .	23
2.23	Techniques de décolage du support temporaire . . . . .	24
2.24	Technique de contrôle du gauchissement par structure temporaire et adhésif	25
2.25	Schéma représentatif des types de molécules retrouvées dans les différents polymères . . . . .	27
2.26	Comportement typique en température d'une résine thermoplastique amorphe	29
2.27	Comportement typique en température d'une résine thermoplastique semi-cristalline . . . . .	29
2.28	Comportement typique en température d'une résine elastomère . . . . .	30
2.29	Comportement typique en température d'une résine thermodurcissable . .	31

2.30	Classement de résines typiques selon leur famille respective . . . . .	31
2.31	Comportement du volume spécifique de résines thermoplastiques . . . . .	32
3.1	Schéma d'assemblage potentiel utilisant un adhésif et un support temporaire.	33
3.2	Montage Instron pour évaluation de la force de gauchissement des laminés	37
3.3	Courbes expérimentales obtenues avec l'Instron pour mesure des forces de gauchissement de laminé . . . . .	37
3.4	Montage utilisé lors des mesures au TherMoiré pour l'évaluation de la force de gauchissement des laminés. . . . .	38
3.5	Profil de température typique avec le TherMoiré . . . . .	39
3.6	Comparaison de mesure de calibration du TherMoiré sur pièce de référence avec et sans usage de plaque de verre. . . . .	40
3.7	Gauchissement pour les laminés coreless avec et sans pression appliquée . .	41
3.8	Gauchissement pour les laminés CSP avec et sans pression appliquée. . . .	42
3.9	Gauchissement pour les laminés thincore avec et sans pression appliquée. .	42
3.10	Précision sur les gauchissements positifs et négatifs. . . . .	43
3.11	Déflexion calculée des supports temporaires non perforés avec pression uniforme. . . . .	47
3.12	Design de support temporaire avec trous . . . . .	47
3.13	Déflexion calculée des supports temporaires perforés avec pression uniforme.	48
3.14	Déflexion calculée des supports temporaires perforés avec pression directement sur site de brasure. . . . .	49
3.15	Étapes d'étalement d'adhésif par vaporisation. . . . .	52
3.16	Test d'étalement d'adhésif par vaporisation . . . . .	53
3.17	Fonctionnement de l'étalement par aiguille de précision . . . . .	54
3.18	Étalement en forme d'étoile avec dimensions extérieures égales à celles du laminé coreless. . . . .	54
3.19	Échantillon ayant un film déposé par aiguille de précision. . . . .	55
3.20	Schéma d'une tournette pour étalement de résine . . . . .	56
3.21	Comportement de l'adhésif déposé au cours des différents stades d'étalement lors la rotation de l'échantillon sur tournette . . . . .	57
3.22	Tentative d'évaluation d'épaisseur de l'adhésif dans la région du site de brasure par mesures non destructive . . . . .	58
3.23	Montages pour collage des échantillons à l'aide des adhésifs. . . . .	59
3.24	Test de collage sur échantillons de pièces de métal. . . . .	60
3.25	Cambrure d'un échantillon utilisé pour faire les tests initiaux de cuisson et collage . . . . .	61
3.26	Mesure de cambrure d'un support temporaire non perforé. . . . .	61
3.27	Mesure de cambrure d'un support temporaire perforé. . . . .	62
3.28	Impact de l'usage des poids périphériques lors du collage de laminés aux supports temporaires. . . . .	62
3.29	État des <i>chip bumps</i> suite à un collage à température élevée avec poids directement sur site de brasure . . . . .	63
3.30	Cuisson adéquate et inadéquate de l'adhésif . . . . .	66

3.31	Photos prises à travers le verre sur le BSM d'un laminé collé sur une plaque de verre . . . . .	67
3.32	Schématisation de la procédure de cuisson par plaque chauffante et par four du BB305. . . . .	68
3.33	Réponse en flux de chaleur lors des tests de CDB du BB305 avec échantillon préparé dans un four. . . . .	68
3.34	Montage utilisé lors du collage d'un laminé à une pièce d'aluminium . . . .	69
3.35	Échantillons de test de collage suivant la technique de collage de tranche de silicium. . . . .	70
3.36	Échantillons de test de collage suivant la technique de collage de puce électronique unique. . . . .	71
3.37	Réponse en flux de chaleur lors des tests de CDB. . . . .	72
3.38	Échantillons recommandés par ASTM pour tests mécaniques en tension. .	73
3.39	Échantillon pour configuration de tests mécaniques en tension et en cisaillement compatibles à température ambiante et à température élevées. . . .	73
3.40	Adhésif BB305 soumis à un test mécanique de tension à température ambiante et à température élevée. . . . .	74
3.41	Pièces de test en tension de l'adhésif BB305 suite au test de tension. . . .	74
3.42	Adhésif HD3007 soumis à un test mécanique de tension à température ambiante et à température élevée. . . . .	75
3.43	Schéma de décolage d'un laminé à l'aide d'une lame insérée entre le support temporaire et le laminé. . . . .	76
3.44	Échantillons décollés par lame de leur support temporaire . . . . .	77
3.45	Montage utilisé pour la dissolution du HD3007. . . . .	78
3.46	Laminé sur support temporaire sans perforation trempé dans le EKC865 en température pendant plus de 6 heures . . . . .	78
3.47	État d'un laminé trempé dans le EKC865 en température pendant 90 minutes collé sur un support temporaire perforé. . . . .	79
3.48	Montage utilisé pour procéder au décolage en utilisant des pièces de silicium comme levier aux coins du laminé. . . . .	79
3.49	BSM du laminé décollé selon le montage avec leviers aux coins du laminé .	79
3.50	Laminé décollé en effectuant multiples trempages de 10 minutes avec rinçage entre chaque trempage. . . . .	80
4.1	Gauchissement simulé d'un assemblage standard présenté en quart d'assemblage . . . . .	82
4.2	Simulation Frisky où les propriétés mécaniques de la puce électronique et de l'underfill sont altérées pour minimiser leur impact sur le gauchissement total du laminé. . . . .	83
4.3	Gauchissement à différentes températures du site de brasure et de l'extérieur du site de brasure pour assemblage standard et assemblage avec support temporaire sans perforations. . . . .	85
4.4	Motif du support temporaire perforé pour simulation Frisky . . . . .	85

4.5	Gauchissement à différentes températures du site de brasure et de l'extérieur du site de brasure pour assemblage standard et assemblage avec support temporaire avec perforations. . . . .	86
4.6	Gauchissement simulé suite au brasage de la puce électronique et de l'ajout de l'underfill. . . . .	87
4.7	Montage au TherMoiré permettant la mesure du gauchissement des échantillons avec et sans support temporaire. . . . .	88
4.8	Gauchissement en température avec BB305 sur support temporaire de verre	89
4.9	Gauchissement en température avec BB305 sur support temporaire d'aluminium . . . . .	90
4.10	Résultat du collage d'un laminé sur un support temporaire en verre . . . .	90
4.11	Gauchissement d'un laminé collé sur support temporaire d'aluminium non perforé à l'aide d'une plaque chauffante. . . . .	91
4.12	Gauchissement d'un laminé collé sur support temporaire d'aluminium perforé dans un four azoté à 210 °C pendant 10 minutes. . . . .	92
4.13	Gauchissement d'un site de brasure collé sur support temporaire d'aluminium perforé dans un four azoté à 210 °C pendant 30 minutes. . . . .	92
4.14	Gauchissement d'un site de brasure collé sur support temporaire d'aluminium perforé dans un four azoté à 230 °C pendant 20 minutes. . . . .	93
4.15	Comparaison visuelle du site de brasure entre le gauchissement positif et gauchissement négatif . . . . .	93
4.16	Procédé d'assemblage simple. . . . .	94
4.17	Procédé d'assemblage par collage temporaire. . . . .	95
4.18	Mesures et tests effectués au cours des différents assemblages. . . . .	96
4.19	Gauchissement et cambrure dans la région du site de brasure lors d'un assemblage complet . . . . .	98
4.20	Gauchissement sur la surface du laminé lors d'un assemblage complet . . .	99
4.21	Gauchissement d'un laminé collé à un support temporaire précédant le brasage à la puce électronique. . . . .	100
4.22	Gauchissement expérimental et simulé pour comparaison de la provenance du gauchissement dans chaque assemblage. . . . .	101
4.23	Aspect visuel après décollage du BSM des laminés collés à l'aide du HD3007 sur support temporaire d'aluminium perforé puis décollés. . . . .	102
4.24	Vue rapprochée après décollage du BSM d'un des laminés collé à l'aide du HD3007 sur support temporaire perforé. . . . .	102
4.25	Aspect visuel après décollage du BSM des laminés collés à l'aide du BB305 sur support temporaire d'aluminium perforé. . . . .	103
4.26	Aspect visuel du BGA sur assemblage par BB305. . . . .	103
4.27	Mode de rupture des billes du BSM pour tests d'adhésion de bille sur laminés assemblés par BB305 et par assemblage standard. . . . .	105
4.28	Schéma montrant l'angle dans lequel l'assemblage a été coupé pour étudier les différentes couches de l'assemblage. . . . .	106
4.29	Coupe transversale des processus d'assemblage standard, simple et par collage temporaire pour l'évaluation de la hauteur des C4. . . . .	107
4.30	Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage par HD3007. . . . .	108

---

4.31	Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage par BB305. . . . .	108
4.32	Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage standard. . . . .	108
4.33	Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage simple sans poids périphérique. . . . .	109
4.34	Coupe transversale des processus d'assemblage standard, simple et par col- lage temporaire pour l'évaluation de l'épaisseur du TIM. . . . .	110
4.35	Cambrure de la puce électronique assemblée à l'aide du BB305 suite à l'étape d'underfill . . . . .	110
4.36	Coupe transversale des processus d'assemblage par HD3007 et par BB305 pour l'évaluation de l'épaisseur du TIM une fois les assemblages décollés du support temporaire. . . . .	111
4.37	Coupe transversale du processus d'assemblage par HD3007 pour l'évaluation de l'épaisseur de l'adhésif entre le support temporaire et le laminé. . . . .	112
4.38	Coupe transversale du processus d'assemblage par BB305 pour l'évaluation de l'épaisseur de l'adhésif entre le support temporaire et le laminé. . . . .	112
4.39	Montage tirant avantage de la gravité pour procéder à l'étape de collage du laminé au support temporaire. . . . .	113

---



# LISTE DES TABLEAUX

3.1	Gauchissement avant et après la dissolution des <i>chip bumps</i> sur les laminés	36
3.2	Pressions correspondant aux poids des verres selon les différents laminés.	40
3.3	Présentation des adhésifs trouvés ayant une stabilité thermique égale ou supérieure à 250 °C	44
3.4	Coefficients d'expansion thermique des laminés et des matériaux de support temporaires potentiels	49
3.5	Propriétés mécaniques nécessaires à la résolution du système d'équations.	50
3.6	Contrainte maximale en valeur absolue à l'interface entre le support temporaire et le laminé coreless.	51
3.7	Étude sur la hauteur des <i>chip bumps</i> du site de brasure avant et après excursion en température, puis après le collage au support temporaire	64
3.8	Temps de cuisson de l'adhésif BB305 selon le fabricant.	65
3.9	Procédure de cuisson du HD3007 préalable au collage d'une tranche de silicium entière	69
3.10	Force maximale des adhésifs à température ambiante et à température élevée.	76
4.1	Paramètres de base à ajuster dans l'environnement Frisky.	82
4.2	Propriétés du support temporaire utilisé dans la simulation Frisky	84
4.3	Résultat de test d'adhésion des billes du BGA des laminés.	104
1	Paramètres de l'interface Frisky	121
2	Paramètres de l'interface Frisky (suite)	122





# CHAPITRE 1

## Introduction

### 1.1 Mise en contexte et problématique

Le monde de la miniaturisation peut être important pour plusieurs personnes. On peut retrouver ce terme dans plusieurs domaines tels que l'art, la biologie, l'économie, la psychologie et beaucoup d'autres domaines. Ici, le sujet d'intérêt est plutôt la microélectronique et sa miniaturisation. Bien que le terme « micro » soit déjà inclus dans le terme, la miniaturisation de la microélectronique est en constante évolution. La miniaturisation des dispositifs électroniques est un phénomène bien présent et accepté de nos jours. Les dispositifs portables, donc miniaturisés, sont de plus en plus diversifiés, performants et accessibles comme il est possible de l'observer [1, 2, 3, 4]. La miniaturisation combinée aux exigences en performance entraînent des défis grandissants au niveau de la mise sous boîtier [5, 6]. Une des manières trouvées par l'industrie pour relever ces défis et augmenter les performances est d'utiliser des substrats organiques pour faire la communication entre la puce électronique et la carte-mère. L'industrie va de l'avant avec ces substrats organiques malgré les nombreux défis à relever lorsqu'utilisés en puce renversée [7, 8].

La mise sous boîtier sert à la communication entre la puce électronique et la carte-mère par l'entremise d'une plateforme intermédiaire connue sous le nom de substrat. Pour améliorer la performance, l'industrie se concentre sur l'augmentation de la densité d'interconnexions entre la puce électronique et le substrat et l'amélioration de la performance du substrat lui-même.

Les deux technologies principales pour effectuer les interconnexions entre une puce et son substrat sont la technologie à puce électronique renversée, ou *flip chip* en anglais (figure 1.1), et la technologie de microcâble (figure 1.2). Alors que la technologie à puce renversée est plus complexe que celle du microcâblage, elle possède beaucoup d'avantages tels qu'une grande densité d'interconnexions possibles et de meilleures performances électriques (bruit de signal plus faible, inductance plus basse) [9]. Pour ces raisons, l'approche à puce renversée, sur lequel le présent projet se concentrera, devient de plus en plus adopté dans la mise sous boîtier électronique. La figure 1.3 présente sommairement les étapes critiques de l'assemblage d'une puce électronique à son substrat avec la technologie de puce renversée. Les étapes sont :

- une déposition de flux pour désoxyder les surfaces et les activer chimiquement pour ainsi favoriser un meilleur brasage.
- Positionnement de la puce sur les plots du substrat. L'alignement et la planéité entre la puce et le substrat sont critiques puisque les connexions sont de petites dimensions.
- Fusion des interconnexions en fournaise (typiquement 250 °C).
- Nettoyage des résidus de flux
- Application et étalement de l'underfill par forces capillaires.
- Cuisson et polymérisation de l'underfill pour permettre une bonne protection mécanique des brasures (typiquement 150 °C).

L'augmentation de couplage entre la puce et le substrat suite à la polymérisation de l'underfill peut induire des contraintes importantes lorsque la différence de coefficient d'expansion thermique (CET) entre le substrat et la puce est grande puisque le dispositif est assemblé et utilisé à des températures différentes. Cette grande différence de CET induit des contraintes importantes pour le dispositif et il devient cambré de manière indésirable. Après l'underfill vient la pose du capot (figure 1.4). Ce capot sert à protéger mécaniquement le dessus de la puce électronique, mais sert aussi à la dissipation de la chaleur. C'est pour cette raison qu'une pâte thermique (*thermal interface material*, ou TIM) est utilisée entre la puce électronique et le capot. Suite à la pose du capot, la dernière étape est la pose des billes sous l'assemblage (*ball grid array attach*, ou BGA attach) comme présenté à la figure 1.5. Ces billes permettent ultimement la connexion de l'assemblage à la carte-mère d'un système informatique.

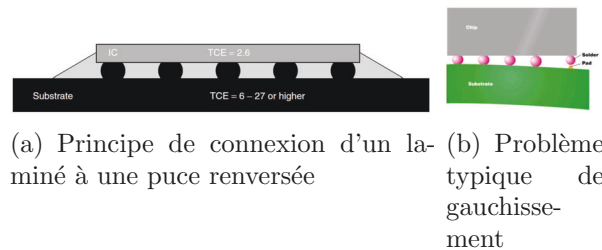


Figure 1.1 Schéma d'une puce renversée connectée à son substrat organique [10].

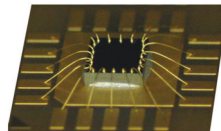


Figure 1.2 Puce électronique connectée par microcâbles [11].

Un des défis majeur concerne le coefficient d'expansion thermique (CET) qui est beaucoup plus élevé pour les substrats organiques que les substrats en céramique utilisés auparavant

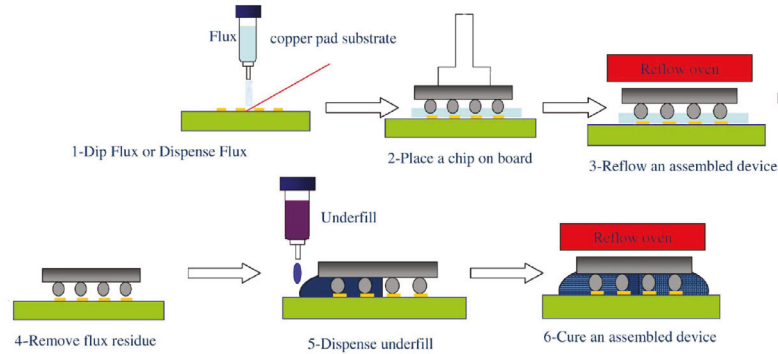


Figure 1.3 Étapes critiques et connexes du projet de recherche dans le processus d'assemblage d'une puce renversée à son substrat organique par brasage conventionnel [12].



Figure 1.4 Capot posé sur l'assemblage ayant une couche de pâte thermique entre la puce électronique et le capot.

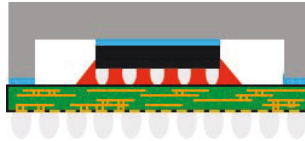


Figure 1.5 Billes posées sous l'assemblage pour communication à la carte-mère d'un système informatique.

(15 à 20 ppm/°C vs 6 à 8 ppm/°C). Ceci rend l'alignement et la formation des joints de brasure avec la puce renversée en silicium (3 ppm/°C) plus difficiles. Un second défi majeur, et sur lequel le projet de recherche est basé, est l'augmentation du gauchissement [7], soit le manque de planéité, du substrat. Ce phénomène provient entre autres du fait que les différentes couches d'un substrat organique possèdent un CET différent. Ces différents CET génèrent des contraintes de cisaillement qui se traduisent en gauchissement [13]. Depuis l'arrivée des substrats organiques sur le marché de la microélectronique dans le début des années 1990 [8], ce phénomène de gauchissement n'a fait qu'augmenter [14, 15] en raison des choix de l'industrie pour une augmentation des performances [15] à coût plus faibles [16].

L'assemblage à puce renversée est beaucoup plus sensible au gauchissement du substrat (voir figure 1.1b) que la technologie du microcâblage, qui est plutôt un procédé séquentiel à température ambiante. Bien que l'*Association des Standards en Électronique du Japon et des Industries des technologies de l'information* [17] régule le gauchissement maximal

du dispositif une fois assemblé, peu importe le type de technologie, le gauchissement du substrat et du module lors de l'assemblage n'est pas autant règlementé. Avec la diminution continue de la taille des joints de brasure des puces renversées et l'augmentation de la densité de joints de brasure, le gauchissement risque de causer de plus en plus de problèmes de rendement dans les industries d'assemblage électronique.

## 1.2 Définition du projet de recherche

*IBM Bromont*, œuvrant dans le domaine de la mise sous boîtier de puces électroniques, est grandement préoccupé par les défaillances liées au gauchissement des substrats organiques pour les technologies à venir. Conséquemment, la *Chaire de Recherche CRSNG-IBM Canada*, à l'Université de Sherbrooke, a élaboré un projet qui s'inscrit dans le domaine du contrôle du gauchissement. L'objectif principal de ce projet est de proposer une technique de réduction du gauchissement efficace, robuste et économique inspirée d'une technique propre à la manipulation des tranches de silicium, soit le *temporary wafer carrier*, utilisant un adhésif et un support temporaire durant l'assemblage à la puce électronique. Cette technique de réduction du gauchissement doit pouvoir résister à de hautes températures et aux différents environnements présents dans un procédé d'assemblage d'une puce électronique à son substrat. Elle doit aussi pouvoir s'adapter facilement à un système de production de masse. De plus, il serait souhaitable que la zone du substrat où la puce est soudée soit le plus plane possible et ce, pour toutes les excursions de température vues dans le procédé d'assemblage. Ainsi, la question principale à laquelle ce projet veut répondre est :

est-il possible de contrôler de manière adéquate le gauchissement des laminés organiques lors du procédé d'assemblage à la puce électronique d'*IBM Bromont* à l'aide d'une technique de support temporaire et d'un adhésif pour réduire les risques de défauts causés par le warpage?

---

## 1.3 Plan du document

Afin de répondre à la question principale du projet de recherche et réaliser les différents objectifs, ce document est séparé en trois grandes sections. La première grande section comporte bien sûr la théorie sur tous les éléments critiques impliqués dans ce projet, soit les substrats organiques, les défauts causés par le gauchissement et les différents types d'adhésif possibles. En plus de cette théorie, la première partie du document répertorie et évalue les points forts et points faibles des différentes méthodes de réduction du gauchissement des substrats organiques lors de leur assemblage à la puce électronique. Elle discute aussi des possibilités d'intégration à la ligne d'assemblage chez *IBM-Bromont*. Bien que développé et complété en grande partie, ce processus se fait de manière continue en raison de l'avancement de la recherche. Par contre, ce catalogage n'est pas qu'une liste de solutions, mais contient aussi plusieurs critères d'évaluation quant à la compatibilité avec la ligne de production d'*IBM Bromont*. Les critères d'évaluation sur lesquels nous nous basons sont présentés ici :

- Contrôle du gauchissement potentiel à chaque étape de procédé d'assemblage
- Compatibilité avec la ligne de production *IBM Bromont*
- Procédés additionnels
- Matériel additionnel
- Fixture et équipement additionnel
- Rendement atteignable
- Fiabilité de la technique
- Production de masse

Pour bien comprendre le contrôle du gauchissement de substrats organiques, il est prioritaire d'évaluer les forces nécessaires au contrôle du gauchissement des substrats organiques en fonction de la température. Cette évaluation sera faite au début de la seconde grande section de ce document. Cette évaluation de la force est importante puisqu'ultimement, la technique permettant la réduction du gauchissement doit toujours être plus *forte* que la force requise pour le contrôle du gauchissement des substrats organiques et ainsi conserver la planéité tout au long processus de brasage. Ensuite, chaque étape individuelle de l'assemblage par collage temporaire est développée. Les adhésifs identifiés sont caractérisés mécaniquement pour s'assurer de leur adhésion adéquate et une seconde caractérisation mécanique est faite sur les supports temporaires employés. Les processus d'étalement, de cuisson et de dissolution d'adhésif terminent cette grande section.

La dernière grande section considère tous les tests effectués précédemment pour évaluer leur efficacité à contrôler le gauchissement et leur compatibilité avec un procédé d'assem-

---

blage réel. Premièrement, des simulations par ordinateur sont effectuées afin d'étudier le comportement théorique du gauchissement avec et sans adhésif et support temporaire. Ensuite, des tests pratiques d'évaluation du gauchissement en température de substrats organiques sont faits en simulant une excursion en température de brasage entre la puce électronique et le substrat organique. Ces excursions en température permettent de confirmer le fonctionnement de la technique de réduction du gauchissement par adhésif et support temporaire. La dernière partie de cette grande section décrit un assemblage complet de puce électronique à son substrat organique en utilisant la solution de contrôle du gauchissement proposée et est comparée à d'autres méthodes d'assemblage plus classiques chez IBM Bromont.

# CHAPITRE 2

## État de l'art

### 2.1 Construction d'un laminé organique

Comme présenté à la section 1.1, plusieurs technologies de substrats et d'interconnexions entre le substrat et la puce électronique coexistent présentement. Bien que le substrat organique soit aujourd'hui une technologie bien établie, plusieurs assemblages où la fiabilité est un élément critique optent encore pour des substrats en céramique. Il y a par exemple des implants intraoculaires où l'environnement ne permet pas d'obtenir une durée de vie de dispositif acceptable, sans compter les problématiques de compatibilité biologique [18]. Le présent projet n'est pas limité par ces contraintes du corps humain et permet donc de travailler sur des substrats organiques dont les performances électriques peuvent ultimement être supérieures à celles des substrats de céramique. Il est toutefois possible de voir que l'intérêt pour les substrats de céramique est encore d'actualité. En ce qui concerne les interconnexions entre substrat et puce électronique, vu la tendance grandissante pour des applications nécessitant une grande quantité d'entrées et sorties sur une puce [19, 20, 21, 22, 23, 24], le présent projet se concentre sur les laminés organiques pour puce électronique renversée de grande taille. Plus particulièrement, la technologie présentée dans ce projet de recherche est le laminé organique à matrice de bille et puce renversée (soit *FCBGA* organique du terme anglais « flip chip ball grid array »). La figure 2.1 présente plusieurs types de technologie développés au fil des années. Basé sur cette figure, le *FCBGA* peut sembler plutôt ancien technologiquement, mais est toujours prévalent dans les produits courant. Cela qui justifie l'usage de ce dispositif pour le présent projet. De plus, les problèmes de gauchissement s'appliquent aussi à plusieurs nouvelles technologies. Ces dernières pourront donc facilement s'inspirer de ce projet.

Plusieurs compagnies produisant des circuits imprimés (*PCB* du terme anglais « *printed circuit board* ») ont tenté de se mettre à produire des substrats organiques vu les similarités avec les *PCB*, mais plusieurs paramètres de précision différaient [19]. Les substrats et *PCB* sont généralement faits en panneau, mais la quantité d'unités par panneau est beaucoup plus grande pour les substrats que les *PCB*. Puisque les substrats organiques possèdent une grande quantité d'interconnexions et que les demandes imposées par l'industrie limitent les dimensions des dispositifs, les substrats organiques ont généralement de très grandes densités de circuits électroniques. C'est tout le contraire de ce qui est retrouvé sur les *PCB*

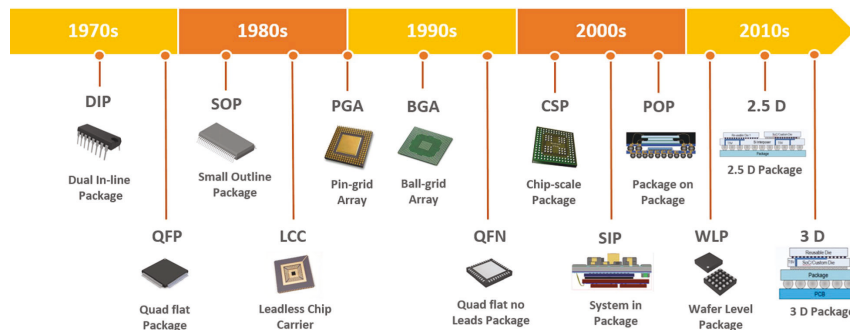


Figure 2.1 Tendence technologique des assemblages de puce électronique au fil des années [25].

où plusieurs zones sont dépeuplées en circuit et connexions électroniques. Conséquemment, la largeur et l'espacement des circuits dans les couches des substrats organiques doivent être mieux contrôlés et plus petits. Une revue des techniques et matériaux les plus fréquemment utilisés pour la composition du substrat organique avec cœur et couches laminées est présentée ici et est généralement appelée *laminé* organique, ou tout simplement *laminé*. La dernière partie de cette section présentera les techniques de conception de laminés sans cœur, soit les laminés *coreless* qui feront l'objet principal du projet de recherche.

À la base, le laminé avec cœur est construit à partir du cœur lui-même. Des couches conductrices et isolantes sont assemblées de part et d'autre comme le présente la figure 2.2. Cette figure présente les étapes générales de conception, mais chaque étape renferme plusieurs sous-étapes permettant d'atteindre le résultat final. Les différents éléments composant le laminé tel que le cœur, les vias, les diélectriques et les conducteurs sont décrits dans les prochains paragraphes.

Le cœur du laminé est généralement formé d'une plaque de fibre de verre où du cuivre a été plaqué à ses surfaces [19]. Sa fonction principale est de donner une rigidité à l'assemblage et limiter la valeur du CET [26] du laminé, mais freine aussi les performances électriques par le fait même [20]. Ceci encourage les fabricants à réduire l'épaisseur des laminés et de leur cœur le plus possible. La figure 2.3 présente les CET typiques des cœurs de laminés dans le plan du laminé (xy) et dans l'axe perpendiculaire du laminé (z). Il est possible de voir que le CET dans le plan du laminé est très similaire au CET du cuivre (17 ppm/°C) et compense grandement pour le CET des couches diélectriques organiques qui peuvent atteindre des CET de 70 ppm/°C [20] lorsque au-dessus de sa température de transition (voir section 2.4.3). Malgré que le CET dans le plan du laminé soit similaire à celui du cuivre, le CET dans l'axe perpendiculaire du laminé peut être problématique et causer un gauchissement supplémentaire s'il manque d'uniformité. En outre, cette variation de



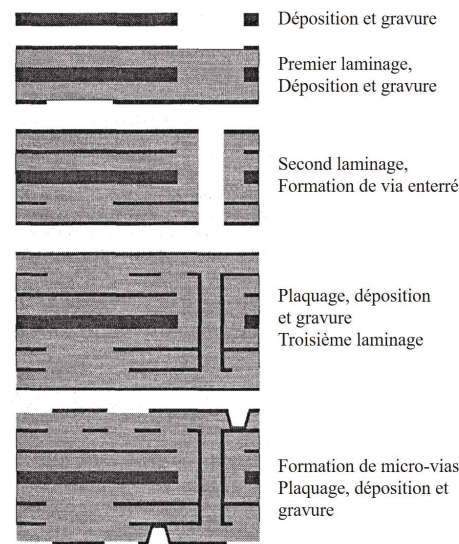


Figure 2.2 Procédé de conception d'un laminé avec cœur [20].

CET peut aussi se combiner au gauchissement généré par le haut CET des couches de diélectriques organiques.

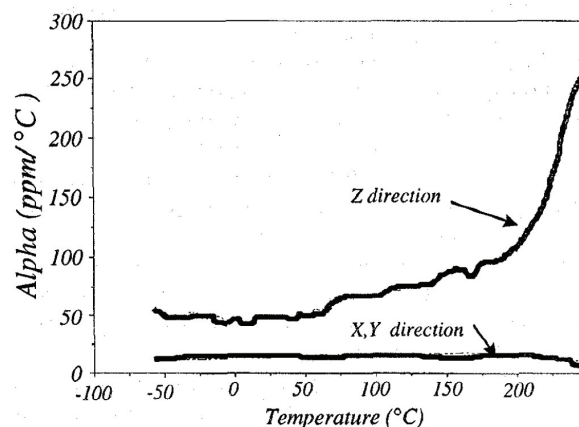


Figure 2.3 CET des cœurs de laminés [20].

Le laminage permet d'ajouter des couches de circuits électroniques. La figure 2.4 présente une vue possible d'un empilement dans un laminé [26]. Sans le diélectrique, toutes les couches de cuivre seraient en contact et ne permettraient à aucun signal précis d'être transmis. Puisque les circuits électroniques sont conçus dans les couches de cuivre et non dans les couches de diélectriques, un simple laminage sans patron particulier peut généralement être fait pour recouvrir les couches de cuivre suivi d'une cuisson partielle pour favoriser l'adhésion du diélectrique [27].

Le placage semi-additif permet d'étaler une couche de cuivre sur la surface du cœur ou sur une couche de diélectrique [27]. La figure 2.5 présente le processus de dépôt du cuivre

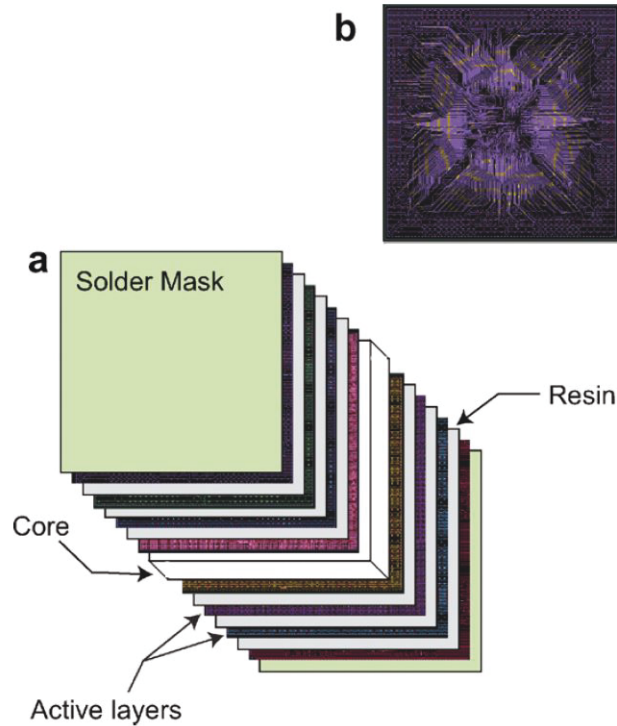


Figure 2.4 a) Schéma d'un empilement de couches actives de cuivre (« active layers »), de résine (« resin ») et d'un cœur (« core »). b) Schéma d'une couche active [26].

pour construire le laminé. Un laser peut être utilisé pour rendre la surface du diélectrique plus adhérente au cuivre, puis une première couche d'initiation de cuivre est déposée par trempage en solution aqueuse sans usage de différence de potentiel (« *electroless plating* ») sur toute la surface du laminé. Une fois la mince couche de cuivre déposée, un processus de photolithographie est effectué pour créer les motifs de cuivre désiré. Un placage électrique (« *electroplating* ») est ensuite effectué pour obtenir une couche de cuivre d'épaisseur adéquate aux endroits sans résine sur le laminé. La résine restante est ensuite nettoyée pour décrouvrir les motifs de cuivre et une gravure est utilisée pour retirer la couche d'initiation de cuivre sans différence de potentiel. Les gravures humides et sèches sont des techniques bien développées et permettent de faire plusieurs circuits d'une même couche simultanément et rapidement [19, 23]. Dépendamment des composantes utilisées et de la précision requise des tracés dans le cuivre, des types différents de gravures seront priorisées. Encore une fois, les motifs de cuivre des différentes couches des laminés viennent influencer sur le degré de gauchissement total du laminé et ils devront être considérés lors de la conception.

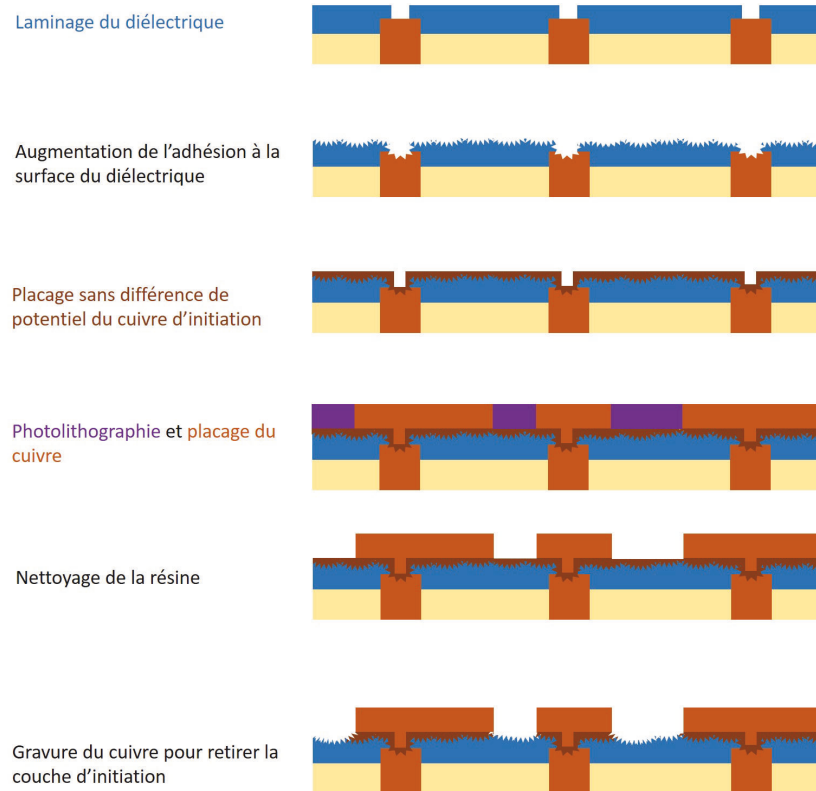


Figure 2.5 Principe de dépôt du cuivre par processus semi-additif [27]. Cette figure n'est pas à l'échelle.

Généralement, plusieurs types de vias coexistent dans un même laminé. Des vias dits enterrés (dont le terme anglais utilisé est « *buried via* »), tel que présenté dans le premier exemple de via à la figure 2.2, sont des vias permettant la communication entre différentes couches internes du laminé, c'est-à-dire qu'une fois le laminé terminé, aucune des extrémités du via ne communique avec les surfaces du laminé. Les seconds vias présentés à la figure 2.2 sont les micros-vias. Ces derniers sont des vias ayant une de ses extrémités communicant avec la surface du laminé alors que l'autre communique avec une des couches internes du laminé. Le terme anglais des micros-vias présente une bonne définition dans leur nom, soit les « *blind vias* » permettant de « voir » jusqu'à une certaine couche interne du laminé. Puis, les vias percés (« *through-vias* ») sont des vias traversant l'épaisseur totale du laminé. Les vias sont des éléments métalliques venant coupler les différentes couches des laminés non seulement d'un point de vue électrique, mais aussi d'un point de vue mécanique vu la rigidité élevée du cuivre par rapport au diélectrique. Les CET variables des différentes couches des laminés viennent générer des forces de cisaillement causées par les couplages et induit donc un gauchissement.

La formation des vias peut être faite de plusieurs manières. Anciennement faits à l'aide de perceuses, les vias sont faits à l'aide de lasers de nos jours [19], mais les différents lasers utilisés possèdent des avantages et des désavantages dépendamment de l'application. En effet, les lasers au CO<sub>2</sub>, fréquemment utilisés pour les vias, peuvent percer les matériaux diélectriques alors qu'ils sont arrêtés par le cuivre et la taille minimale des vias est de 65  $\mu\text{m}$ . Les lasers ultraviolets sont aussi utilisés pour former des vias, mais contrairement aux lasers CO<sub>2</sub>, ils percent le cuivre et la taille des vias peut être plus petite, soit 50  $\mu\text{m}$  et moins [19]. Les vitesses d'ablation diffèrent d'un laser à l'autre et des attentions particulières au temps d'exposition doit donc être prise. Les trous peuvent ensuite être plaqués par électrolyse par exemple, bien que des techniques sans électrolyse sont de plus en plus populaires [24].

Il existe diverses méthodes permettant de créer un laminé coreless, mais deux de ces méthodes ressortent du lot. La première méthode fait appel aux mêmes techniques que celles présentées précédemment. En effet, un pseudo-cœur de fibre de verre laminé de cuivre est employé pour faire les couches de diélectrique en alternance avec des couches de cuivre gravées. Lorsque le nombre de couches requises est atteint, le laminé construit est pelé du pseudo-cœur [19]. L'avantage de cette technique est qu'il est possible d'utiliser les mêmes techniques que celles développées précédemment pour les laminés avec cœur, mais ce procédé est limité par le fait que sa construction est faite une étape à la fois. La seconde technique emploie une première couche de diélectrique partiellement cuite où des vias sont percés par laser puis remplis de pâte conductrice par sérigraphie. Une feuille de cuivre est laminée de part et d'autre du diélectrique puis gravée pour correspondre aux motifs de cuivre nécessaire. Les couches de diélectrique et de cuivre sont ainsi alternées jusqu'à atteindre le nombre de couches requises [19]. Contrairement à la première technique présentée, cette technique permet d'ajouter deux couches à la fois [19].

Comme mentionné précédemment, l'usage d'un cœur est habituellement fait pour mieux contrôler le CET et les propriétés de gauchissement du laminé. Ainsi, malgré les meilleures performances électriques et le potentiel de réduction des coûts, les laminés coreless sont moins utilisés vu leur grand gauchissement et la grande différence de CET entre la puce électronique et le laminé [19]. La figure 2.6 présente une comparaison de gauchissement par rapport à différentes épaisseurs de cœur de laminé lors d'une excursion en température simulant un brasage à une puce électronique. Ces courbes sont des moyennes de plusieurs laminés selon les différentes épaisseurs de laminés et il est clairement visible que les laminés coreless sont ceux ayant le moins de contrôle sur le gauchissement en excursion en température.

---

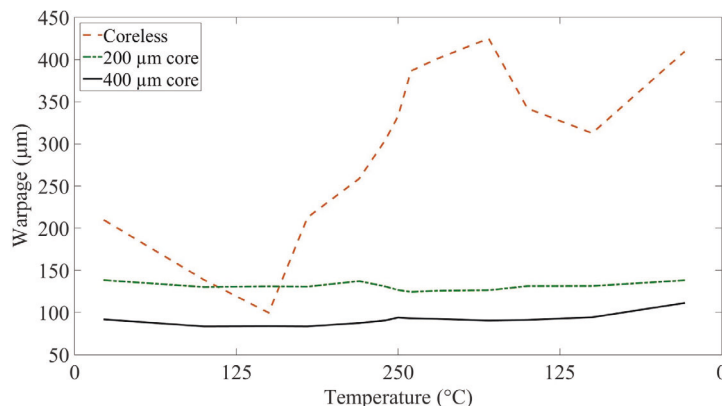


Figure 2.6 Gauchissement moyen de différents laminés selon l'épaisseur de leur cœur [28].

## 2.2 Défauts et problèmes causés par le gauchissement

Les travaux antérieurs des professeurs Danovitch et Sylvestre sur le sujet étaient davantage orientés sur la minimisation de l'impact des différents CET entre la puce électronique et le laminé. Ceci permettait de réduire le stress induit entre la puce électronique et le laminé. Leurs travaux ciblent des problèmes tels que les *white bumps* [29, 30, 31, 32] comme présenté à la figure 2.7. Ce nom provient en fait de la manière qu'ils sont détectés à l'aide de capteur ultrasonique qui retournent un « point blanc », ou *white bump*, lorsque ce genre de défaut survient. Les différents CET en jeu induisent de fortes contraintes dans les interconnexions reliant la puce électronique au laminé. Depuis l'introduction de la loi *RoHS* limitant l'usage de plomb dans les dispositifs électroniques, les interconnexions sont beaucoup plus rigides qu'auparavant et les contraintes sont transmises beaucoup plus facilement dans les circuits reliant les transistors dans la puce, soit le *back end of line* (BEOL) de la puce électronique. Ces contraintes indésirables peuvent créer des fissures telles qu'observées à la figure 2.7b et peuvent être multipliées par les diélectriques à basse constante diélectrique qui ont généralement des propriétés mécaniques médiocres.

En plus des *white bumps*, d'autres problèmes peuvent survenir lors du processus de brasage d'un laminé à sa puce électronique et ceux-ci peuvent être exacerbés par le gauchissement du laminé. Il est aisé d'associer le problème de gauchissement à un joint partiel ou ouvert comme présenté à la figure 1.1b où le fait que les joints sont trop distancés pour permettre un contact entre les deux et empêcher le brasage [33], mais d'autres facteurs sont aussi à considérer lorsque les joints sont partiels ou ouverts.

Un pont entre joints de brasure (*bridging*) présenté à la figure 2.8 est un autre problème courant relié au gauchissement. Ce dernier peut réduire localement l'espacement entre la puce et le laminé, occasionner la compression des joints, l'élargissement de leur diamètre

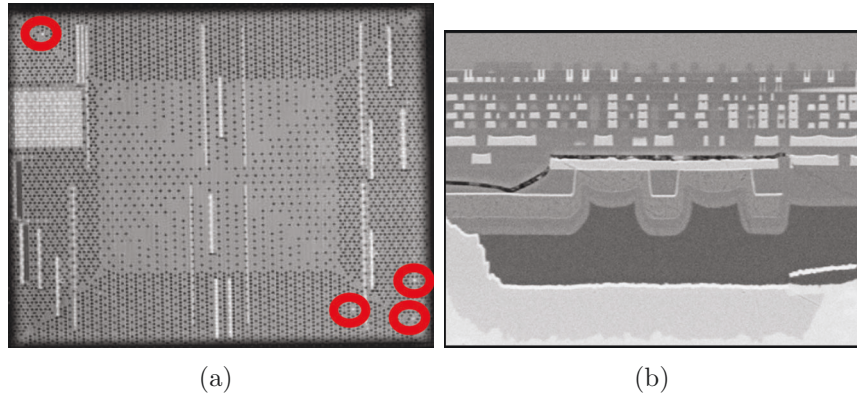


Figure 2.7 a) image ultrasonique de *white bumps* au niveau des interconnexions entre une puce électronique et un laminé et b) fissure dans le BEOL signifiant un *white bump*.

et la formation d'un pont [34]. De plus, ce phénomène ne sera pas nécessairement uniforme au cours du brasage puisque le gauchissement varie en fonction de la température et peut causer plusieurs ponts dans une même région [35].

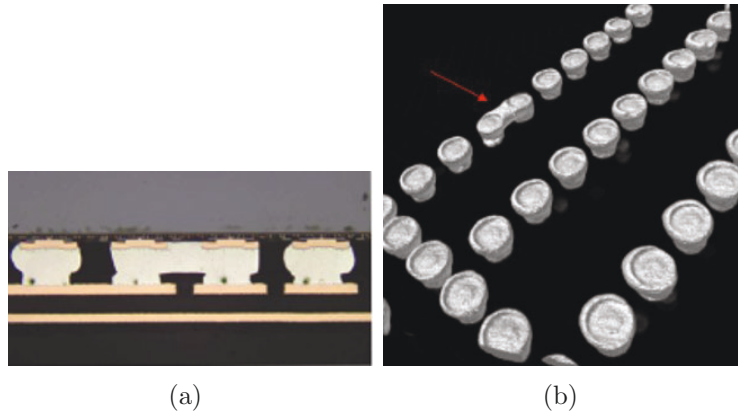


Figure 2.8 Pont entre les joints reliant le laminé à la puce électronique [36].

Les micro-billes [36], comme le présente la figure 2.9, sont des défauts semblables aux ponts, mais ne lient pas nécessairement deux interconnexions adjacentes. Elles peuvent survenir lors d'un mouillage partiel de l'interconnexion (figure 2.10). Ceci induit une extrusion du joint [37]. Ce dernier phénomène pourrait être aggravé par les pressions locales et les espaces restreints induits par le gauchissement. Ces billes ne sont pas nécessairement synonymes de défectuosité du dispositif, mais peuvent être problématiques. Par exemple, avec l'ajout de l'underfill, elles peuvent être déplacées par le courant capillaire et finir par toucher deux interconnexions adjacentes. De là, des résultats indésirables sont générées.



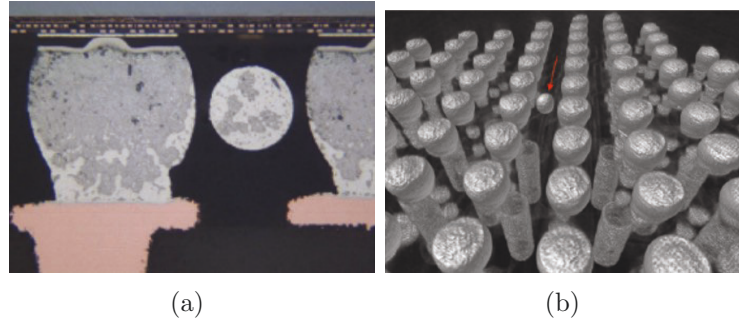


Figure 2.9 Micro-bille entre les joints de la puce électronique et du laminé [36].

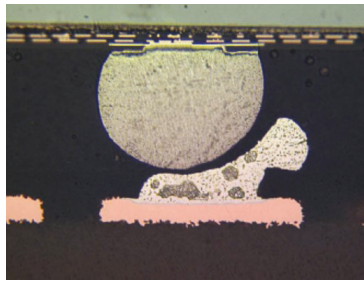


Figure 2.10 Joint partiel ou ouvert entre la puce électronique et le laminé [36].

## 2.3 Techniques de contrôle du gauchissement des laminés pendant l'assemblage à la puce électronique

Comme mentionné précédemment, le gauchissement a toujours été un phénomène présent dans le domaine de l'assemblage microélectronique. Mais étant donné la forte relation entre les défauts de gauchissement et la complexité des composants électroniques qui ne cessent d'augmenter, l'industrie doit porter de plus en plus d'attention pour ne pas provoquer de défauts reliés au gauchissement lors de l'assemblage.

Beaucoup de techniques ont été étudiées afin de réduire les problèmes de gauchissement dans les laminés lors du processus d'assemblage des puces électroniques à leurs laminés, mais certains problèmes persistent. L'usage de raidisseur (ou « *stiffener* »), comme le présente la figure 2.11, est une de ces techniques [38]. L'idée est d'utiliser des tiges métalliques suffisamment fortes que l'on colle à la surface du laminé avant que la puce électronique ne soit brasée au laminé. Cet assemblage du laminé, de la colle et des tiges passe ensuite dans le processus de brasage à la puce électronique. Le produit fini conserve les raidisseurs. Comme les laminés contiennent de plus en plus d'interconnexions d'entrées et de sorties, l'emplacement et le design des raidisseurs demeurent ambigus pour qu'ils soient efficaces. De plus, une zone où le contrôle du gauchissement est critique est la zone où le brasage

survient, soit le *site de brasure*, et le design des raidisseurs ne garantit pas la planéité de ladite zone.

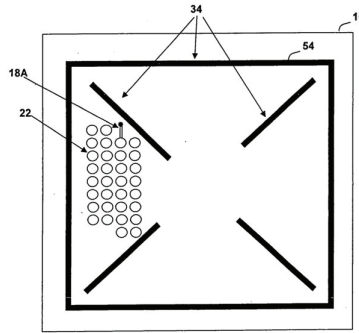


Figure 2.11 Schéma représentatif d'une disposition de raidisseurs. 10 - limites du laminé vu du dessus, 18A - présence de cuivre sur le laminé, 22 - représentation de la matrice de billes (*Ball Grid Array*, ou BGA), 34 - positionnement de tiges en angle sur la surface du laminé tout en évitant le site de brasure, 54 - raidisseur en circonférence du laminé [39].

D'autres techniques tentent de contourner le problème de variation du gauchissement selon la température en effectuant un chauffage local plus spécifiquement seulement où le brasage se fait. Il y a par exemple l'usage de micro-ondes à fréquence variable [40] dont le schéma est présenté à la figure 2.12, ou l'usage de laser [41] présenté à la figure 2.13.

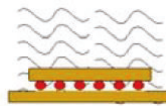


Figure 2.12 Principe de fonctionnement des micro-ondes à fréquence variable. La puce et le laminé sont entourés des micro-ondes, mais seules les interconnexions sont sensibles aux ondes [42].

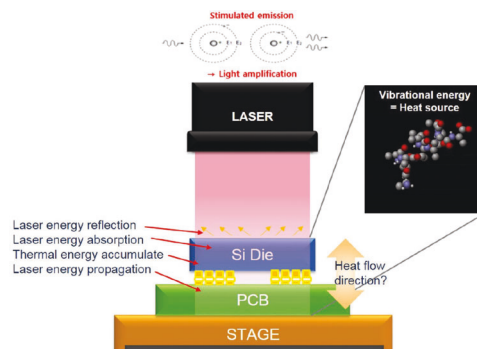


Figure 2.13 Schéma présentant le principe de brasage à l'aide d'un laser [43].

L'usage de micro-ondes à fréquence variable nécessite l'usage de matériau polaire comme brasure et permet un chauffage local jusqu'à un certain point. En effet, cette technique



permet au laminé d'être de 20 °C à 30 °C inférieur à la température de la zone de brasage [40]. Cette différence de température est malgré tout une grande augmentation de la température du laminé en raison du métal présent dans le laminé qui conduit bien la chaleur. Bien que la température générale soit plus faible, l'augmentation de température peut facilement induire une variation du gauchissement pouvant provoquer des risques de défauts. De plus, le champ électrique ne sera pas nécessairement uniforme et peut entraîner une variation dans la température des joints de brasure présents sur une même puce. Une production à grande échelle en est ainsi limitée. Un principe semblable a été étudié par Xu *et al.*, mais cette fois avec des champs magnétiques, et des problèmes d'uniformité de champ magnétique peuvent toujours avoir lieu [44]. Quant au brasage par laser, elle nécessite une atmosphère telle que du N<sub>2</sub> afin d'être optimale [41]. Ceci permet de chauffer rapidement les joints de brasure en limitant le chauffage du reste du laminé, mais entraîne le processus coûteux de changement complet de technologie déjà en place.

Une autre technique fait appel à un système sous vide pour réduire le gauchissement de laminé [45]. La figure 2.14 présente bien le fonctionnement d'un tel dispositif. Cette technique s'appuie sur un support temporaire qui est installé avant le passage du laminé dans le processus de brasage à la puce électronique. Ici, le laminé sert de « bouchon » entre la pression ambiante et le vide à l'intérieur du support temporaire. Ainsi, la pression ambiante appliquera une force sur la surface entière du laminé. Si le support est suffisamment plat et si le scellage du vide est bien maintenu, le laminé sera suffisamment plat et les probabilités de défauts lors du brasage de la puce électronique seront réduites. Le support doit bien sûr être en mesure de résister aux températures de brasage. Bien que cette technique permet une bonne planéité lors du brasage, elle peut nécessiter beaucoup d'assistance si le scellage est brisé pour une raison ou une autre lors de l'assemblage à la puce.

Le brasage de la puce électronique au laminé est généralement faite à l'aide d'un four, mais peut aussi être faite par une technique d'assemblage par thermo-compression (*thermo-compression bonding*, ou TCB) [46]. Un schéma de cette technique est présenté à la figure 2.15a et se base sur la pression de la tête pour s'assurer de la planéité de la zone où le brasage survient. Une variante de l'assemblage par TCB appelée chauffage différentiel (*differential heating*) permettrait, tout comme le TCB, de réduire l'interaction indésirable entre la puce électronique et le laminé [47]. La figure 2.15b montre le principe de fonctionnement de cette technique. Initialement, cette technique est optimisée pour réduire l'impact de la grande différence de coefficient d'expansion thermique entre le laminé et la puce. Lors du brasage des interconnexions, la base supportant le laminé est maintenue à une température plus basse que la température des interconnexions et limite l'expansion

---

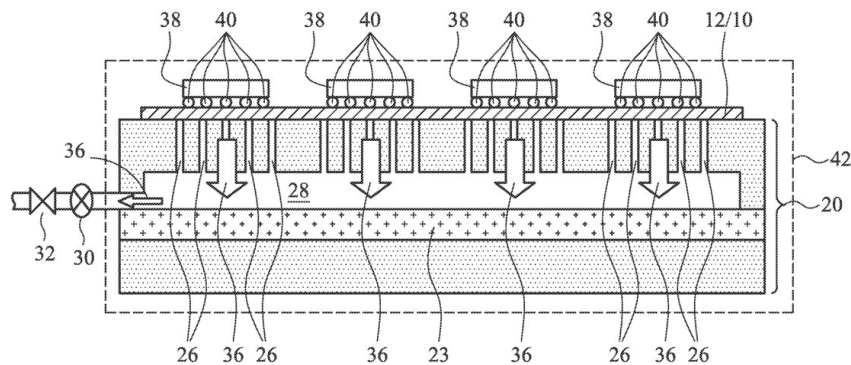


Figure 2.14 Schéma d'une solution de contrôle du gauchissement par pression sous-vide [45]. 12/10 - laminé, 20 - fixture permettant le vide, 26 - trous reliant le dessous des laminés à la pompe, 28 - passage d'air jusqu'à la pompe, 30 - pompe, 32 - valve gardant le vide, 36 - flèche indiquant le sens que l'air se déplace, 38 - puce électronique, 40 - interconnexions à souder, 42 - montage complet permettant le brasage.

thermique du laminé. Conséquemment, le stress induit dans les interconnexions est beaucoup plus faible et empêche aussi le phénomène de *white bumps*. Même si le but premier de cette technique n'est pas de minimiser le gauchissement du laminé, elle y parvient tout de même en utilisant une base sous-vide qui maintient le laminé bien en place et permet un bon transfert et contrôle de chaleur. Comme mentionné précédemment, un support tel que présenté à la figure 2.14 où la température est contrôlée peut être coûteux et demander beaucoup d'assistance en cas de vide brisé. Ici aussi, l'adaptation d'une ligne d'assemblage à un nouveau système doit être considérée et les coûts associés à cette technique sont nécessairement élevés. Les paramètres reliés à cette technique peuvent aussi être délicats puisque la pression utilisée peut entraîner un mauvais alignement des joints de brasure entre le laminé et la puce électronique. La figure 2.16 montre le genre de situation qui pourrait survenir en cas de problèmes reliés aux paramètres de pression, d'alignement ou de température avec l'utilisation de ces techniques. Dans un processus de brasage conventionnel, un phénomène d'auto-alignement se produit et rend l'alignement moins critique en raison de l'équilibrage des tensions de surface des joints de brasure en contact [48]. En outre, comme présenté à la figure 2.15, seule une puce à la fois peut être brasée à un laminé et limite ainsi la vitesse de production d'un tel appareillage. Le degré d'alignement de la puce au laminé rend la tâche de brasage plusieurs puces simultanément difficile même s'il serait possible d'augmenter la vitesse de production.

D'autres solutions déjà expérimentées sont des techniques où le contrôle du gauchissement est fait avant même que le laminé ne soit conçu. Cependant, comme certaines études le montrent, le gauchissement précis en chaque point du laminé doit être connu d'avance

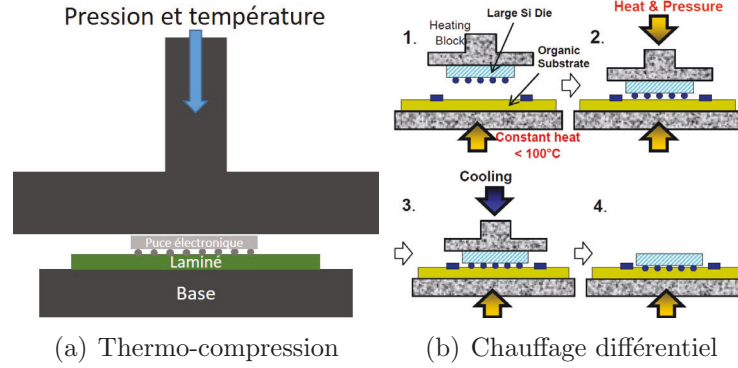


Figure 2.15 Schéma du fonctionnement d'un brasage par thermo-compression et par chauffage différentiel.

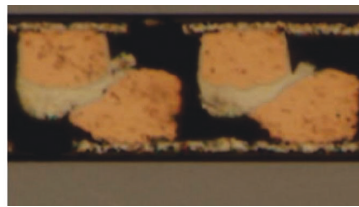


Figure 2.16 Mauvais alignement de deux joints de brasure entre puce électronique et laminé [46].

[49]. Comme présenté à la figure 2.17, la taille des billes de brasure (généralement appelé « *chip bumps* » dans le jargon de l'encapsulation microélectronique) et l'angle des plots d'interconnexion entre le laminé et la puce peuvent être ajustés afin d'épouser la forme du laminé utilisé. Un problème survient alors pour la production à grande échelle puisque chaque laminé peut avoir une différente forme et une différente grandeur de gauchissement et ce, même dans une même famille de laminé [50, 51]. En effet, comme les laminés sont construits sur de grands panneaux puis coupés en laminés individuels, les contraintes présentes dans le panneau ne sont pas nécessairement uniformes sur la totalité du panneau.

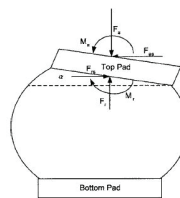


Figure 2.17 Schéma de la préparation des plots d'interconnexions à angle dépendamment du gauchissement présent sur le laminé [49].

D'autres études présentent aussi des modifications faites directement sur le laminé pour tenter de réduire le gauchissement [52]. La figure 2.18 présente une modification possible qui peut réduire le gauchissement en utilisant des circuits imprimés courbés, mais ceci

peut signifier une augmentation des coûts considérables pour les fabricants de laminés si ce n'est pas déjà en place.

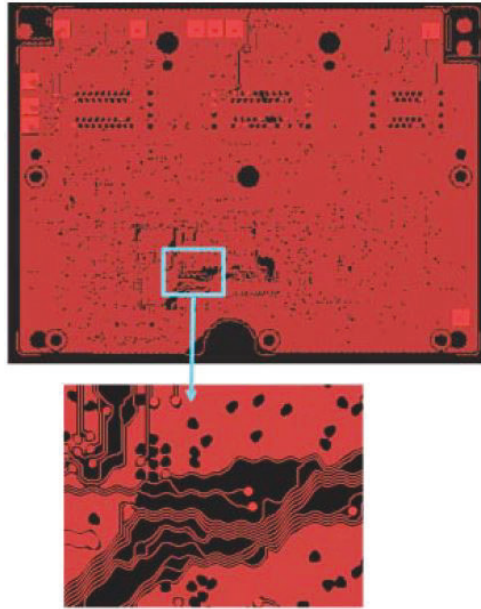
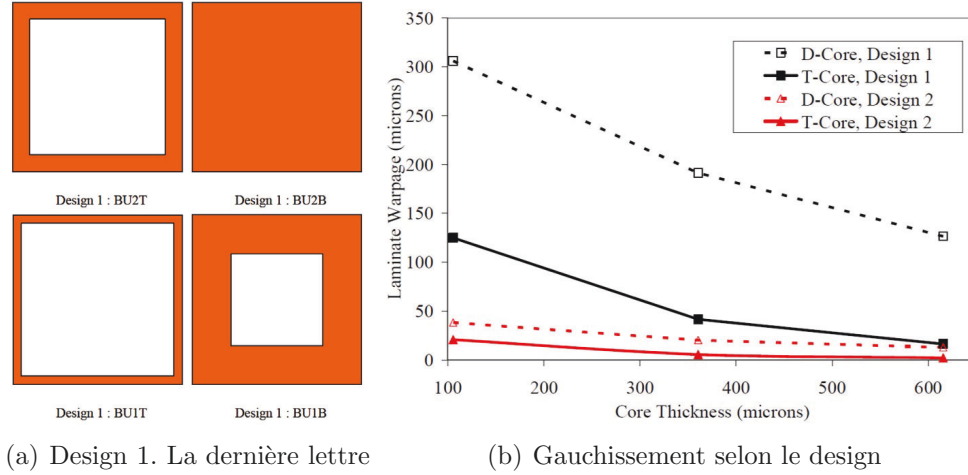


Figure 2.18 Circuit imprimés courbés permettant la réduction du gauchissement [52].

La conception d'un laminé inclut beaucoup de cuivre de part et d'autre du cœur (*core*) du laminé et n'est pas nécessairement uniformément réparti de chaque côté du cœur. Ainsi, en raison de ce déséquilibre et de la variation du coefficient d'expansion thermique des différents composants d'un laminé, le gauchissement peut être très important [53]. La figure 2.19 présente des résultats de simulations qui ont été faits sur le sujet. Tandis que ces simulations présentent des résultats très intéressants lorsque la répartition de cuivre est adéquate, certaines contraintes de conception de circuit peuvent limiter une telle répartition. Une autre proposition serait aussi de trouver des matériaux, comme observés à la figure 2.19 dont le coefficient d'expansion thermique est plus faible [53]. Par contre, dans plusieurs cas, ce n'est pas possible. Ces modifications de matériaux plus fins peuvent entraîner des coûts supplémentaires et il n'est pas confirmé que des matériaux à plus faible coefficient d'expansion thermique soient disponibles, ou compatibles avec les technologies de fabrication utilisées de nos jours.



(a) Design 1. La dernière lettre est *T* pour *top* et *B* pour *bottom*

(b) Gauchissement selon le design

Figure 2.19 Simulation du gauchissement d'un laminé selon sa répartition de cuivre dans ses différentes couches [53]. Le design 1 est le design où le cuivre est mal réparti de part et d'autre du cœur. Le design 2 a une meilleure répartition du cuivre et le *D-Core* est un cœur à plus grand coefficient d'expansion thermique que le *T-Core*.

## 2.4 Contrôle du gauchissement par adhésif et support temporaire

### 2.4.1 Inspiration pour le contrôle du gauchissement de laminés du présent projet

La recherche a souvent été amenée à s'inspirer d'un autre domaine pour arriver à ses fins même si, certaines fois, l'inspiration était accidentelle. On peut penser par exemple à la découverte du four à micro-onde où Percy Spencer travaillant sur un émetteur à courte longueur d'onde a découvert que les ondes émises par son radar modifié avaient fait fondre une barre de chocolat dans sa poche [54]. Ainsi, des techniques provenant d'un autre domaine peuvent certainement être utiles au contrôle du gauchissement. On peut par exemple s'inspirer des supports temporaires de tranche de silicium (*temporary wafer carrier*) où l'on colle une tranche de silicium à un support (habituellement du verre) pour permettre de faire des opérations requérant de hauts degrés de planéité avant de relâcher la tranche de silicium [55]. Bien que grandement connexe au domaine de la microélectronique, cette technique est pratiquement exclusive à la manipulation de tranches de silicium. La figure 2.20 montre bien le principe d'installation du support d'une telle technique pour une tranche de silicium. Dépendamment de quelques paramètres tels que la vitesse de rotation, la viscosité et la température de cuisson, l'épaisseur de l'adhésif peut être modifiée, mais chaque adhésif possède une épaisseur optimale selon ses propriétés. Généralement, cela consiste

à étaler un adhésif sur la face active de la tranche de silicium puis effectuer le collage au support selon le type d'adhésif étalé. Les adhésifs, qui seront décrits en détail à la section 2.4.3, sont des matériaux polymères et peuvent être photosensibles. Chaque polymère possède sa recette particulière pour être utilisé entre le support temporaire et la tranche de silicium, mais une procédure générale est habituellement fournie par le manufacturier.

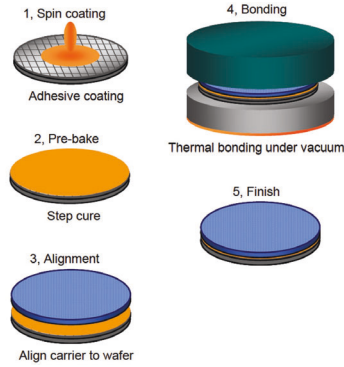


Figure 2.20 Principe d'installation d'un support temporaire pour tranche de silicium [55].

Dans la manipulation de tranches de silicium, un tel processus peut permettre d'effectuer des opérations telles que l'amincissement de tranche de silicium et ainsi créer des vias traversant la tranche de silicium (*through silicon vias*, ou TSV) pour intégration dite *3D* [56, 57], soit en assemblant plusieurs puces les unes par-dessus les autres. Il est possible de gagner en facteur de forme et aussi en longueur d'interconnexions [58, 59]. La figure 2.21 présente bien l'allure probable de TSV en vue de profil utile pour la communication entre puces tout en limitant la surface d'utilisation. Vu l'amincissement très poussé des tranches, soit des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 25  $\mu\text{m}$ , la manipulation devient très délicate et fragile, mais facilite l'intégration des TSV, généralement à base de cuivre [59]. Ainsi, le collage sur support temporaire à l'aide d'un adhésif est nécessaire. En plus de permettre un amincissement uniforme, un collage sur support temporaire permet de faire plusieurs étapes de déposition de matériaux pouvant induire des contraintes, qui normalement feraient courber le silicium aminci et causeraient des manques d'uniformité et d'épaisseur dans les différents dépôts. La figure 2.22 présente différentes méthodes de conception des TSV, incluant l'amincissement de silicium, et l'usage des supports temporaires.

Plusieurs méthodes sont proposées afin de faire le décollage entre les tranches de silicium et leurs supports. Chacune possède des points forts et des points faibles. La figure 2.23a présente l'ablation de l'adhésif par laser. Dans cette situation, il est nécessaire que le support soit transparent à la longueur d'onde utilisée du laser. Comme le présente Zoschke *et al.*, le laser employé est totalement absorbé par l'adhésif utilisé et n'abîme donc pas les



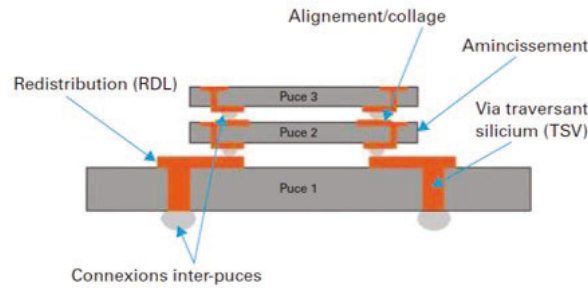


Figure 2.21 Arrangement de puce en 3D avec différentes longueurs de TSV [59].

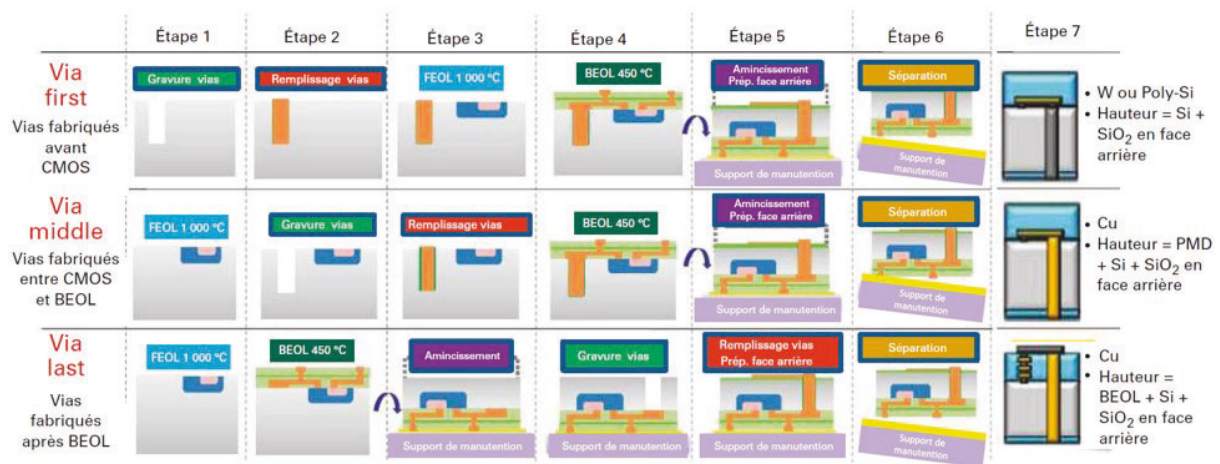


Figure 2.22 Différentes étapes possibles de conception de TSV et usage de support temporaire pour amincissement des tranches de silicium [59].

composantes situées sur la tranche de silicium. La séparation par laser laisse des traces d'adhésif, mais le nettoyage au solvant peut se faire en aussi peu de temps que 30 secondes lorsque l'accès à l'adhésif est direct [56]. L'utilisation d'un support perforé pour séparer l'assemblage du support temporaire permet de dissoudre totalement l'adhésif, mais prend un peu plus de temps vu l'accès partiellement direct (figure 2.23b). Zoschke *et al.* parle de temps variant entre 16,5 minutes et 6,5 minutes dépendamment de la température utilisée entre 60 °C et 80 °C respectivement [56]. La figure 2.23c présente plutôt une technique où l'on se sert uniquement de force de cisaillement et de température. Ici, un certain type d'adhésif et des températures plus élevées sont nécessaires, mais le temps de détachement est plus faible [57]. Des contraintes sont appliquées lors du décollage et si le dispositif est fragile, il peut être endommagé. La dernière technique présentée à la figure 2.23d, celle du pelage, est une autre méthode employant une force mécanique pour le décollage et pourrait donc aussi induire des contraintes dans le dispositif. Dépendamment de sa cohésion et de

son adhésion, il est possible d'appliquer une tension mécanique entre le support et le dispositif sur un des côtés et faire la séparation par concentration des contraintes dans l'adhésif [60].

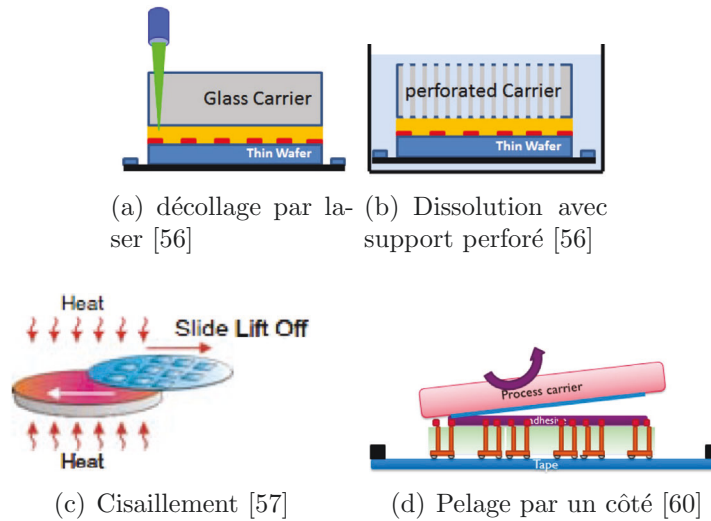


Figure 2.23 Techniques de décolage du support temporaire.

## 2.4.2 Travaux antérieurs sur adhésifs et supports temporaires dans le brasage des laminés

Un sujet directement relié au phénomène de gauchissement a déjà été abordé précédemment dans les recherches du professeur David Danovitch en collaboration avec le professeur Julien Sylvestre. Des techniques brevetées [30, 31] et présentées à la figure 2.24 se servent d'une structure temporaire combinée à un adhésif pour permettre de réduire les contraintes sur les *chip bumps*, mais aussi le gauchissement de l'ensemble du dispositif lors du brasage du laminé à la puce électronique. Bien que très similaire au projet qui est proposé dans le présent projet de recherche, l'objectif principal des professeurs Danovitch et Sylvestre était de réduire le CET effectif des laminés et non le contrôle du gauchissement pour réduire les problèmes de white bumps. Ainsi, des matériaux à CET similaires à celui de la puce électronique étaient employés comme support temporaires afin d'approcher le CET effectif du laminé à celui de la puce électronique.

## 2.4.3 Les différentes familles d'adhésifs

Avant les années 50, l'assemblage de matériau était principalement fait à l'aide de moyens mécaniques tels que l'usage de boulons, de vis, de rivets, de brasage (pour les métaux) et de couture (pour les cuirs et textiles). On retrouvait les colles et adhésifs pour la fabrication des meubles et l'emballage.



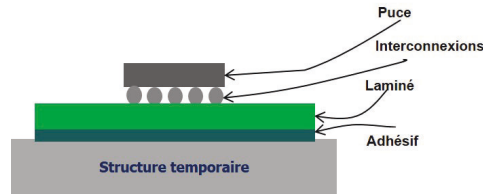


Figure 2.24 Schéma représentatif de la technique de contrôle du gauchissement par structure temporaire et adhésif [30, 31].

C'est la Deuxième Guerre mondiale et le domaine de l'aéronautique qui a apporté la base des adhésifs connus aujourd'hui [61, 62]. Les nouveaux produits chimiques développés ont apporté de nouvelles propriétés d'adhérence, de durcissement et de durabilité aux colles et adhésifs. De plus, la fin des années 50 et un projet d'avion supersonique volant à Mach 3 (trois fois la vitesse du son) a permis un grand développement dans le domaine des adhésifs dits « polymères thermostables », soit des adhésifs stables en température. La NASA et ses missions *Apollo* ont maintenu les activités de recherche actives par la suite pour reprendre un essor dans les années 80 avec l'industrie électronique.

Les adhésifs offrent plusieurs avantages par rapport aux autres techniques déjà mentionnées dans cette section. Les adhésifs permettent un excellent ratio de résistance mécanique par rapport à leur poids. Dans le domaine de l'électronique et dans la présente application, les adhésifs permettent plutôt d'assembler des matériaux de différente nature tels que du plastique sur métal sans l'usage de techniques dommageables où les contraintes peuvent être concentrées en certains endroits. Des techniques telles que l'usage de rivets ou de vis concentreraient ces contraintes. De plus, un autre avantage très utile à la présente application est qu'un adhésif laisse les surfaces extérieures des assemblages lisses, soit sans présence de boulons ou de rivets obstruant les surfaces extérieures. Enfin, beaucoup de procédés en électronique sont automatisés et l'utilisation d'adhésifs peut aussi être automatisée afin d'être efficace et rapide [61].

Dépendamment de l'approche utilisée, il peut y avoir plusieurs types, ou plusieurs familles, ou encore, plusieurs branches de différents adhésifs possibles. Dans le présent projet, on peut tenter de différencier les adhésifs *permanents* de ceux *temporaires*, mais aussi les adhésifs *thermoplastiques* de ceux *thermodurcissables*.

Logiquement, dans le premier cas, l'adhésif permanent serait employé sur des structures afin de les maintenir collées ensemble pour la durée totale de leur vie utile que ce soit pour maintenir les flancs d'un meuble ensemble, ou pour maintenir des composantes électroniques ensemble soit avec ou sans connexions électriques entre ces composants. Quant à l'adhésif temporaire, il est utilisé pour effectuer des tâches délicates sur un composant

pour ensuite retirer la colle une fois la tâche terminée. L'adhésif facilite ainsi la réussite de la tâche délicate. Un exemple plus concret a été présenté dans la section 2.4.1.

Quant aux adhésifs thermoplastiques et thermodurcissables, ils sont plutôt opposés en terme de comportement face à la température, mais sont tous les deux faits de polymères, plus communément connus sous le nom de plastiques [63]. L'adhésif thermoplastique a une tendance à s'assouplir en fonction de la température jusqu'à ce qu'il atteigne sa température de transition où il aura un aspect plutôt liquide [62]. De plus, ce comportement est totalement réversible si l'on reste dans l'intervalle de températures prescrites pour l'adhésif [63]. L'adhésif thermodurcissable, comme son nom l'indique, se solidifiera sous l'effet d'une haute température. Contrairement à l'adhésif thermoplastique, le processus n'est pas réversible. Une fois l'adhésif thermodurcissable cuit, il ne peut pas revenir à un état dit non polymérisé.

Il est difficile de décrire précisément les adhésifs thermoplastiques et thermodurcissables vu leur grande histoire, mais aussi vu leur composition chimique qui peut grandement varier. La base de ces polymères est ce qui peut être appelé un *monomère*, qui est une molécule et qui est le plus petit maillon reproduit une multitude de fois afin d'obtenir la quantité suffisante pour recouvrir une surface désirée. En grande quantité, les monomères deviennent un *polymère*. Selon la nature du monomère, différents types de liens chimiques peuvent se créer entre les monomères. Évidemment, la force de ces liens peut influencer sur plusieurs aspects microscopiques et macroscopiques du matériau polymère tels que la grosseur de chaque molécule dans le polymère, ou encore ses propriétés thermiques [63]. En effet, ces différents liens chimiques permettent d'assembler les monomères dans différentes conformations de chaînes ou de macromolécules comme le schématise la figure 2.25. Les polymères thermoplastiques ont des macromolécules très indépendantes les uns des autres, alors que les polymères thermodurcissables ont un comportement tout à fait opposé puisque les monomères sont grandement rapprochés les uns des autres et interreliés dans plusieurs directions. Comme observé à la figure 2.25, il existe aussi un entre-deux nommé élastomère qui peut montrer des liens entre plusieurs chaînes de monomères, mais ces liens sont plus distancés et moins nombreux que les polymères thermodurcissables [63]. Différents comportements sont observables de ces sous-branches de polymères comme il a été mentionné précédemment pour les thermoplastiques et les thermodurcissables. Quant aux élastomères, ils ont généralement une faible rigidité par rapport aux thermoplastiques, mais ne peuvent pas se liquéfier [63].

Comme les polymères sont des chaînes de monomères, ce sont des événements probabilistes qui gouvernent la longueur des chaînes de monomères, la quantité de ramifications

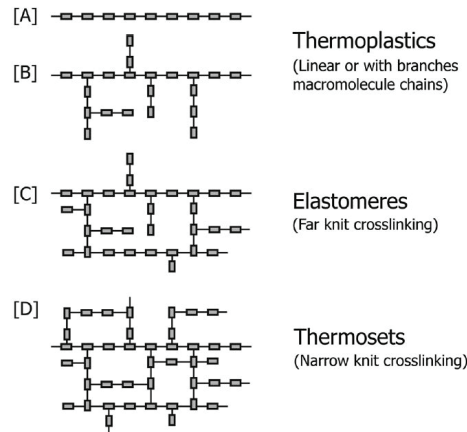


Figure 2.25 Schéma représentatif des types de molécules retrouvées dans les différents polymères [63].

sur une chaîne de monomères, le nombre de liens qui seront faits entre plusieurs chaînes de monomères et bien d'autres facteurs. Contrairement aux matériaux tels que les métaux, c'est en raison de ces événements probabilistes que des propriétés comme la température de fusion n'est pas une température précise, mais plutôt un processus à plusieurs étapes qui peut s'étendre sur une plage étendue de température [63]. Par exemple, selon l'arrangement des monomères dans une macromolécule et la proximité des monomères influant sur l'énergie potentielle moléculaire, l'énergie nécessaire pour briser les liens dans la macromolécule peut grandement être influée. De plus, comme la densité locale dans le polymère même peut varier en raison des événements probabilistes, l'énergie nécessaire pour briser la macromolécule peut varier. Conséquemment, c'est pour cette raison que des plages de température sont observées pour les changements de phase des polymères.

Un des polymères qui sera utilisé dans le présent projet est un thermoplastique, mais plus précisément une résine thermoplastique. Comme mentionné à la figure 2.25, cette résine thermoplastique est composée de chaînes de monomères avec peu ou pas de branches et dont le maillage entre les chaînes est très faible, ou inexistant. La présence de certains éléments chimiques et sa structure influe grandement sur sa résistance à son environnement comme son comportement face à l'illumination UV [63] qui peut être utile pour certaines applications telles que celle présentée à la figure 2.5 par exemple. La résine peut, dans certains cas, être très sensible à ce genre d'illumination (photosensible), alors que dans d'autres cas, ne pas l'être du tout. On retrouve principalement deux grandes familles de résines thermoplastiques, soit les résines thermoplastiques amorphes et les résines thermoplastiques semi-cristallines. Contrairement à l'état amorphe des résines thermoplastiques, l'état semi-cristallin permet un certain degré d'organisation dans la résine et dépend de

l'affinité de certains atomes présents dans les monomères. En raison de l'organisation statistique des polymères, le degré de cristallisation ne dépasse pas 80 % [63].

Il est habituellement possible de différencier les deux types de résine thermoplastique par leur transparence à l'état macroscopique. Les résines thermoplastiques amorphes sont généralement transparentes, alors que les résines thermoplastiques semi-cristallines sont plutôt opaques. Les deux types de résine thermoplastiques possèdent une température de transition vitreuse  $T_g$  et une température de décomposition  $T_d$  causant la dégradation chimique du polymère. Avant  $T_d$ , la résine amorphe est caractérisée par une température de flux  $T_f$ , alors que la résine semi-cristalline est plutôt caractérisée par une température de fonte  $T_m$  [63]. Sous  $T_g$ , la mobilité des molécules est grandement limitée par les fortes interactions intermoléculaires. Il n'y a pas de changement de position, ou d'arrangement du polymère, et très peu de changements de segments de la chaîne de monomères ou des ramifications sur la chaîne de monomères induits par la température [63]. Au-dessus de  $T_g$ , le polymère devient plus souple compte tenu de la plus grande mobilité des chaînes et ses ramifications, mais est toujours stable mécaniquement. Pour les résines amorphes, lorsque la température atteint  $T_f$ , les chaînes de monomères commencent à glisser les unes sur les autres, et la résine fond. Aucune dégradation chimique ne survient à ce stade [63]. Du côté des résines semi-cristallines, lorsque la température atteint  $T_m$ , les liens responsables de la cristallinité du polymère sont brisés, et la résine commence à fondre.  $T_m$  excède normalement  $T_f$  de l'état amorphe de la résine, ainsi l'état entier de la résine est déformable [63]. De plus, à ce stade, l'état est entièrement réversible en réduisant la température du polymère tant que la température n'atteint pas la température de dégradation [63]. Lorsque les résines sont sous  $T_g$ , leur état est pratiquement solide et limite donc leur affinité à adhérer sur des surfaces. À haute température, la résine devient plus souple jusqu'à être liquide où un contact peut se produire entre la résine et la pièce à coller. Dans le présent projet, comme les résines sont employées dans la manipulation des tranches de silicium, elles sont bien sûr adhérentes au silicium et aux métaux qui peuvent y être déposés.

Les figures 2.26 et 2.27 présentent les différentes températures descriptives et les comportements mécaniques généraux de ces deux types de polymères thermoplastiques en température. Il est possible de constater que même si ces deux types de résine sont des thermoplastiques, celle amorphe est généralement utilisée sous la température de transition vitreuse alors que celle semi-cristalline est utilisée au-dessus de la température de transition vitreuse. L'une semble se briser lorsqu'elle atteint son seuil de résistance maximale alors que l'autre semble se déformer dans les zones de températures d'usage habituel [63]. Il est possible que ces différences soient à considérer si les contraintes en jeu à l'in-

terface entre le laminé et le support temporaire deviennent très importantes. En outre, la résine semi-cristalline reste solide jusqu'à atteindre  $T_m$  où les liens cristallins finissent par se briser et la résine devient donc malléable [63]. Dans les deux types de résine thermoplastique, si la température atteint  $T_d$ , les chaînes du polymère sont décomposées en entités plus petites qu'un monomère et sont dans un état irréversible. La force mécanique des résines thermoplastiques diminue grandement avec l'augmentation de la température. Ceci peut être un désavantage pour le contrôle du gauchissement, mais peut aussi apporter une certaine aide si le type d'adhésif est bien choisi. Une résine thermoplastique pourrait contrôler le gauchissement d'un laminé de manière adéquate aux températures désirées, mais permettrait aussi un décollage plus aisé à température élevée.

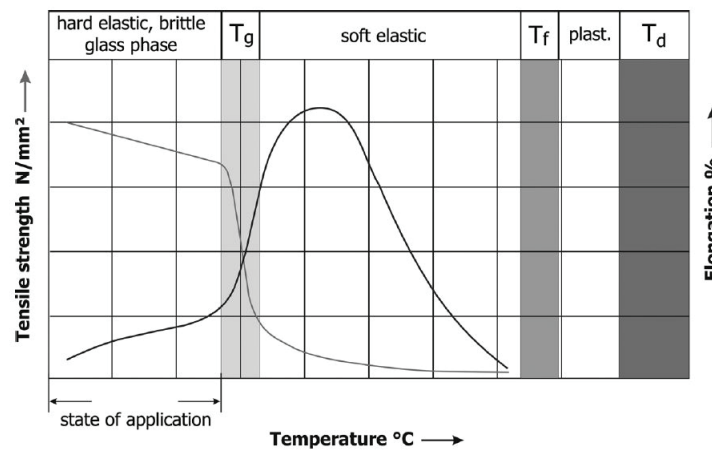


Figure 2.26 Comportement typique en température d'une résine thermoplastique amorphe [63].

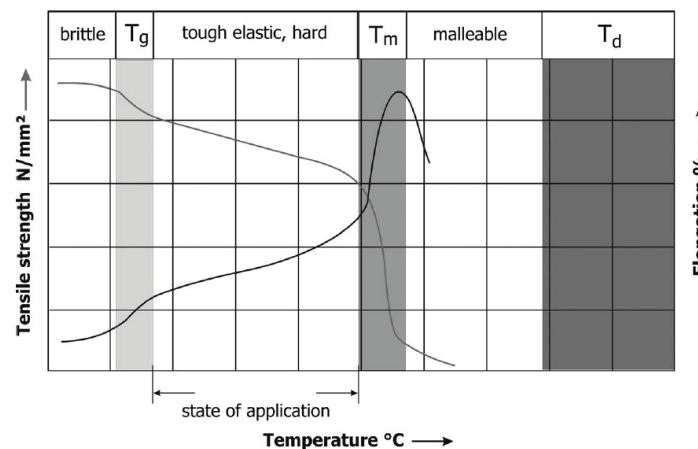


Figure 2.27 Comportement typique en température d'une résine thermoplastique semi-cristalline [63].

Comme les élastomères ne seront pas utilisés dans le présent projet, une brève description est mentionnée ici. Omettre de les mentionner donnerait une présentation incomplète des types de polymères existants.

Les élastomères sont des plastiques avec des maillages plus complexes que les thermoplastiques, mais sans être aussi complexes que les polymères thermodurcissables. Une fois formés, ils ne peuvent généralement pas être fondus sans dégrader la structure moléculaire [63]. Comme les thermoplastiques semi-cristallins, ces polymères sont utilisés au-dessus de leur température de transition vitreuse  $T_g$ . On retrouve à la figure 2.28 le comportement mécanique typique en température des élastomères.

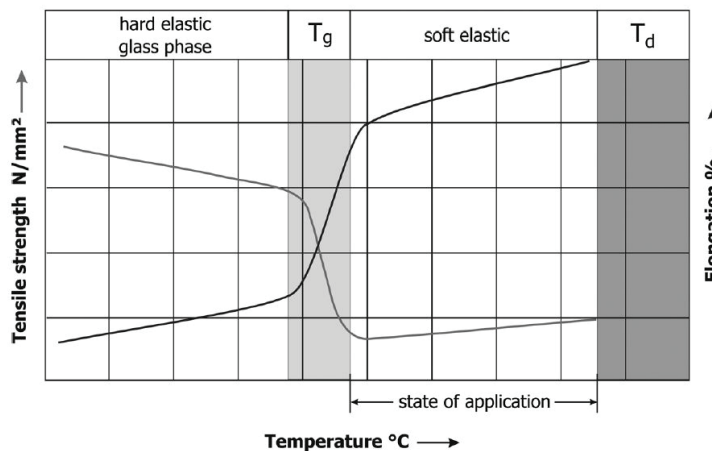


Figure 2.28 Comportement typique en température d'une résine élastomère [63].

Les résines thermodurcissables sont des polymères ayant une très haute complexité dans le maillage des monomères et rend son changement d'état très difficile. La figure 2.29 présente le comportement mécanique typique d'une résine thermodurcissable et il est impossible d'observer un changement d'état de l'adhésif avant d'atteindre la température de décomposition de la résine [63]. Vu la stabilité mécanique de cette résine, le contrôle du gauchissement peut être très efficace si le collage est fait adéquatement. Il faut garder en tête que le CET des résines peut influencer sur le gauchissement lorsque la température varie et un manque d'uniformité de résine peut être critique pour le gauchissement.

Comme mentionné pour les résines thermoplastiques, l'adhérence des résines thermodurcissable est très faible à basse température, voire nulle. Cependant, ces résines peuvent devenir extrêmement adhérentes au-dessus d'une certaine température définie par leur composition chimique. C'est le cas d'une des résines qui sera utilisé dans le présent projet, soit le HD3007, qui devient très adhérent au-dessus de 200 °C [64].

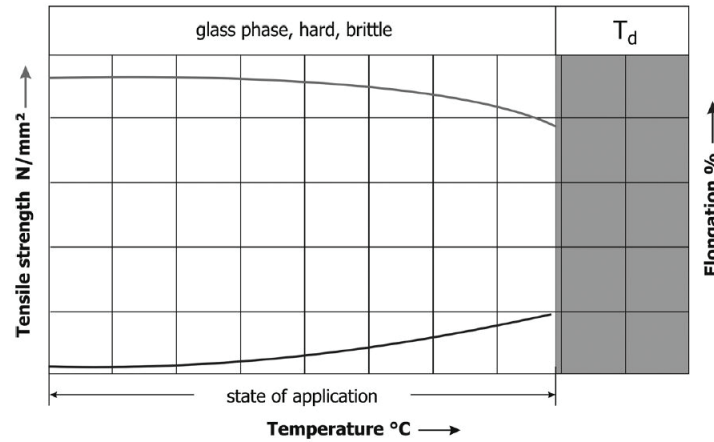


Figure 2.29 Comportement typique en température d'une résine thermodurcissable [63].

Avec ces trois types de résines de base, il est bien sûr possible de faire plusieurs compositions de résines, ou même doper une résine avec un certain type de particules, afin d'obtenir certaines propriétés spécifiques [63]. La figure 2.30 présente une rapide liste de résines possibles selon leur famille respective.

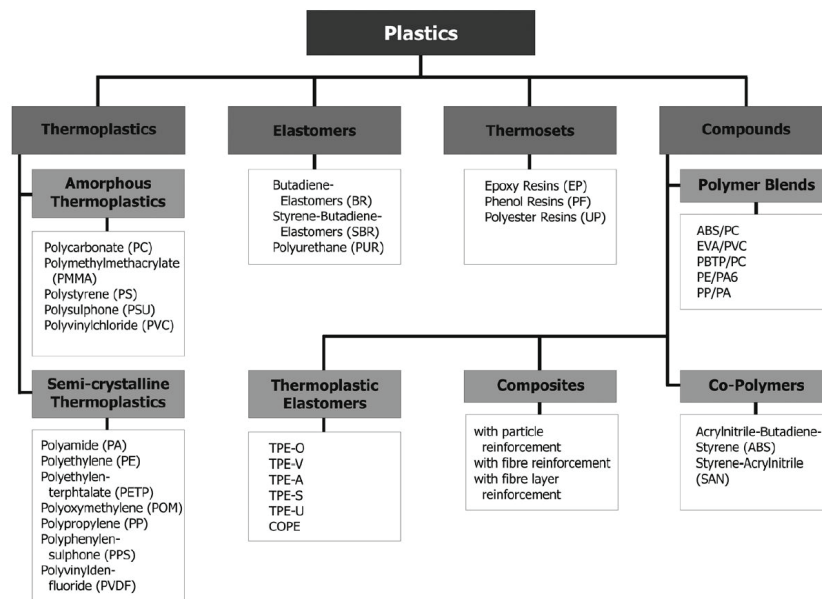


Figure 2.30 Classement de résines typiques selon leur famille respective [63].

Il ne faut pas oublier que l'augmentation de la température induit dans tous les types de polymères une augmentation des oscillations de ses molécules, et cause ainsi une augmentation de son volume spécifique [63]. La figure 2.31 présente le comportement typique du volume spécifique en température pour des polymères thermoplastiques amorphes et semi-cristallins. Selon la quantité de résine utilisée et son uniformité, des variations d'épaisseur

peuvent survenir et faire varier la planéité du laminé en température. De plus, les propriétés ne sont généralement pas les mêmes lorsqu'une résine est observée au-dessus, ou en dessous d'une de ses températures caractéristiques comme  $T_g$  par exemple.

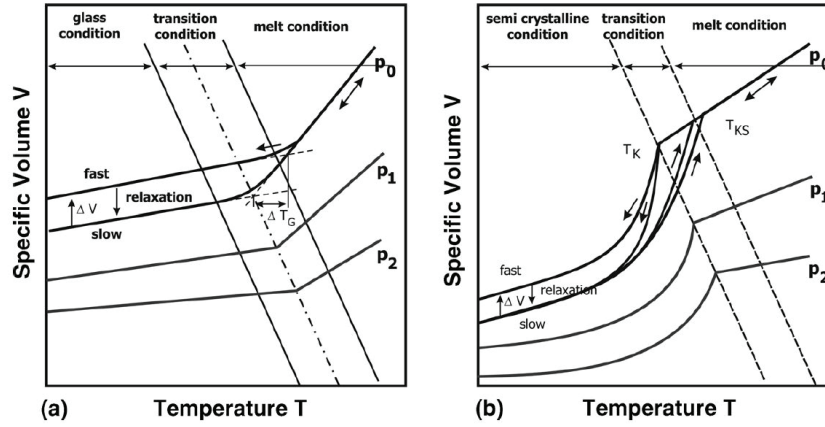


Figure 2.31 Comportement du volume spécifique de résines thermoplastiques (a) amorphe et (b) semi-cristallin [63].



# CHAPITRE 3

## Développement du concept d'assemblage

Maintenant que les connaissances de base pour comprendre les fondements du présent projet de recherche sont révisées, il est possible de débiter la présentation des résultats qui ont permis de mener à bien le projet en entier. L'idée principale du projet pourrait s'apparenter à ce qui est présenté à la figure 3.1 et repose sur l'hypothèse qu'avec un adhésif adéquat et un support temporaire optimisé, il serait possible d'adapter la technique de manipulation des tranches de silicium à la problématique de gauchissement présent dans l'assemblage de puce renversée.

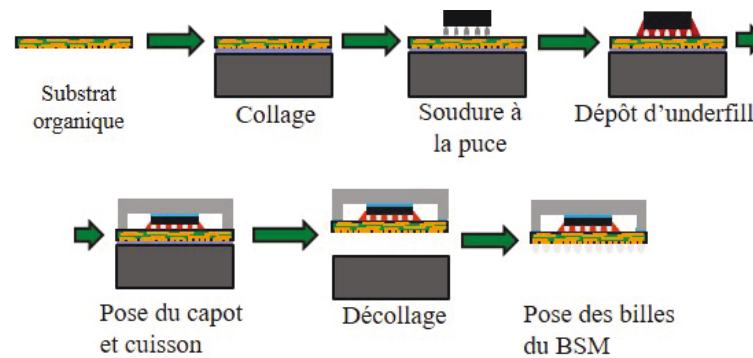


Figure 3.1 Schéma d'assemblage potentiel utilisant un adhésif et un support temporaire.

Tout d'abord, les différences entre un laminé et une tranche de silicium impose des modifications de certains paramètres très importants. Premièrement, les plots font non seulement des protubérances à la surface du laminé, mais limitent aussi la température à laquelle il est possible de travailler. En effet, ces joints de brasure, généralement faits en alliage d'étain, d'argent et de cuivre fondent à des températures d'environ 230 °C. Une seconde différence à considérer est le CET des laminés qui est beaucoup plus élevé et engendre généralement des gauchissements beaucoup plus élevés. De plus, les laminés sont composés d'éléments chimiques qui peuvent être très sensibles aux produits chimiques présents dans les adhésifs et matériaux connexes.

Du côté des adhésifs, ils nécessitent aussi une adaptation par rapport à leur usage habituel. Premièrement, bien qu'il faille procéder au collage à des températures inférieures à 230 °C comme mentionné dans le dernier paragraphe, l'adhésif doit tout de même être efficace à des températures supérieures à 230 °C pour procéder au brasage à la puce électronique.

De plus, avec les paramètres de collage développés, les adhésifs devront être en mesure de contrer la force générée par le gauchissement des laminés pour maintenir les laminés plats. Et même si les adhésifs sont suffisamment forts pour contrer les forces de gauchissement, ils doivent aussi être facilement dissolvables ou décollables pour que le dispositif assemblé soit fonctionnel.

Conséquemment, les prochaines sections serviront à présenter les étapes accomplies afin de déterminer si, malgré ces différences, l'hypothèse ci-haut mentionnée pourrait toujours être validée. Une meilleure compréhension du gauchissement des laminés sera présentée, puis une caractérisation et une optimisation des adhésifs et supports temporaire suivront pour ensuite présenter un test d'assemblage utilisant la solution d'adhésif et support temporaire.

### 3.1 Évaluation de la force de contrôle du gauchissement des laminés

Afin d'envisager la solution par adhésif et support temporaire, il faut d'abord s'assurer que les forces requises pour maintenir les laminés plats ne sont pas inatteignables et qu'elles soient compatibles avec le procédé d'assemblage d'un laminé à la puce électronique chez *IBM Bromont*. Plusieurs étapes ont dû être faites afin de pouvoir avoir une bonne approximation de la force nécessaire pour maintenir les laminés plats lors de l'assemblage. Ainsi, dans cette section, les différents outils utilisés pour cette évaluation de force seront présentés. De plus, sachant que le gauchissement des laminés est fonction du coefficient d'expansion thermique des éléments le composant, il est possible d'imaginer que la force nécessaire pour maintenir le laminé plat sera variable selon la température à laquelle on mesure cette force.

Trois types de laminé ont été utilisés pour ces tests afin d'observer les tendances pour différents laminés. Il y a bien sûr les laminés *coreless* (sans cœur) de dimensions 55 mm par 55 mm qui est le centre du projet, mais aussi les laminés *thincore* de dimensions 42,5 mm par 42,5 mm (cœur de 400  $\mu\text{m}$ ) et *CSP* (ou « *Chip Scale Package* ») de dimensions 28 mm par 35 mm (cœur de 200  $\mu\text{m}$ ) à titre de comparatif.

#### 3.1.1 Dissolution des chip bumps des laminés

Comme les tranches de silicium, les laminés organiques devraient être plats pour procéder à ses différentes étapes d'assemblage avec la puce électronique. Par contre, le laminé possède beaucoup plus de « défauts » de planéité que la tranche de silicium. Ces défauts, étant les *chip bumps*, sont nécessaires au fonctionnement de l'assemblage d'un laminé et sa puce électronique, mais causent un réel problème lors de l'évaluation de la force de contrôle du

---

gauchissement des laminés. En effet, ces irrégularités peuvent être plusieurs dizaines de microns d'épaisseur pour les plots de connexion des capacités et résistances périphériques au site de brasure et en moyenne 25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur dans la région du site de brasure.

Pour évaluer les forces nécessaires permettant de maintenir les laminés plats, les méthodes les plus simples sont d'appliquer une force connue sur les laminés et observer son comportement en gauchissement. Une manière d'appliquer cette force est de positionner le laminé entre deux surfaces planes avec application de pression et ensuite évaluer la planéité de la surface. Ainsi, s'il y a présence de défauts de planéité, tels que des *chip bumps* dans la forme générale du laminé, l'application de la pression ne sera pas uniforme sur le laminé et sera plutôt concentrée sur les *chip bumps*. Conséquemment, une étape de dissolution des *chip bumps* était nécessaire.

Le trempage des laminés dans l'acide nitrique (dilué à 30%) a été proposé pour dissoudre les *chip bumps* faites d'alliage SnAgCu. Certaines inquiétudes ont été soulevées par rapport à cette procédure : l'acide nitrique n'allait-il pas corrompre les mesures subséquentes, soit la mesure du gauchissement et l'évaluation de la force de contrôle du gauchissement ? Des mesures de gauchissement avant et après dissolution ont donc été faites avec une faible quantité d'échantillons afin de s'assurer que la procédure était acceptable pour la poursuite du projet.

Les premiers tests sur les laminés coreless et thincore ont été fructueux et le procédé a été effectué sur tous les laminés de ces types. L'allure visuelle des laminés a aussi permis de conclure le bon fonctionnement de la technique de dissolution des *chip bumps*. Le tableau 3.1 présente les valeurs avant et après dissolution des *chip bumps* de ces deux types de laminés. Bien que la différence de gauchissement avant et après la dissolution soit élevée dans certains cas, la grande valeur de gauchissement de base des laminés doit être considérée. Ainsi, la différence relative de gauchissement reste faible. La dissolution peut avoir quelque peu changé les contraintes par rapport à la température et ultimement changer le gauchissement du laminé lorsque mesuré à température ambiante. De plus, la dissolution nécessitait la protection du BSM du laminé à l'aide d'un ruban adhésif résistant à l'acide nitrique puisque les plots de cuivre réagissent fortement à cet acide. Bien que la tendance du gauchissement n'ait pas été modifiée, il est possible qu'une faible partie de la variation du gauchissement soit due à l'étape de décollage de ce ruban protecteur une fois la dissolution complétée.

Le troisième type de laminé a été testé en dissolution, soit les laminés CSP, mais les résultats ont été peu concluants. La zone de brasage à la puce électronique, soit le site de

---

Tableau 3.1 Gauchissement avant et après la dissolution des *chip bumps* présentes sur les laminés.

Valeurs présentées en $\mu m$		Échantillons									
		i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii	ix	x
Thincore	Avant dissolution	161	121	95	107	156	120	104	124	107	163
	Après dissolution	107	131	79	115	154	129	115	130	108	172
Coreless	Avant dissolution	324	373	408	390	367	357	376	417	352	353
	Après dissolution	283	419	377	360	328	307	354	374	332	277

brasure, composé de piliers cuivre, n'a pas bien réagi à l'acide nitrique et a modifié considérablement le gauchissement des laminés testés. Cependant, puisque le site de brasure couvre la majeure partie du laminé et qu'il est composé de cuivre, soit un métal plus dur et moins sensible à la température que l'alliage de SnAgCu, l'hypothèse qu'il n'était pas nécessaire de dissoudre le cuivre de ces laminés a été faite. La surface des *chip bumps* présentes sur les laminés coreless et thin core étant beaucoup moins importante et ayant une ample quantité d'alliage de SnAgCu recouvrant le cuivre a limité l'attaque du cuivre dans les couches internes des laminés.

### 3.1.2 Instron

L'Instron a été le premier instrument utilisé pour tenter d'évaluer la force de contrôle du gauchissement des laminés. La figure 3.2 présente bien le montage utilisé pour l'Instron. Un capteur de force attaché à un bras de déplacement vertical permettait d'appliquer une force sur un montage composé d'un support, du laminé étudié et d'une plaque de céramique par-dessus le laminé. La plaque de céramique permettait de bien répartir la pression appliquée au-dessus du laminé. Il était très important d'avoir des plaques planes pour rendre les laminés suffisamment plats et la plaque de céramique permettait justement une bonne planéité du montage. Le parallélisme entre les plaques n'était pas critique puisqu'une bille entre le capteur et la plaque du dessus permettait un appui adéquat sur le laminé à tous moments de l'expérience. De plus, un four pouvait être utilisé afin de faire des mesures de force de gauchissement en température.

Les résultats obtenus étaient des courbes de la force appliquée en fonction du déplacement. La figure 3.3 présente les résultats et l'idée derrière ces courbes était de pouvoir détecter à quel moment le laminé allait être plat en observant un changement de comportement dans la courbe. Par hypothèse, la force appliquée sert à rendre le laminé plat, mais rendu à un certain point, le laminé est entièrement plat et le laminé commence à être comprimé. À ce moment, la courbe devrait changer de comportement.

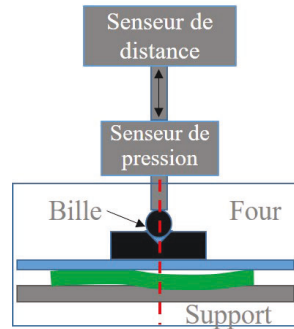


Figure 3.2 Montage Instron pour évaluation de la force de gauchissement des laminés.

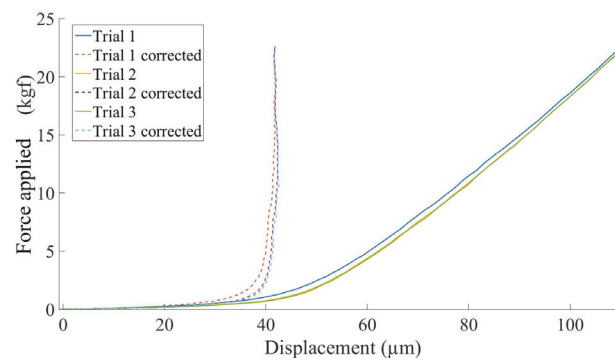


Figure 3.3 Courbes expérimentales obtenues avec l'Instron pour mesure des forces de gauchissement de laminé (courbes « Trial » 1, 2 et 3) et la correction faite par *MatLab* (courbes « Trial corrected 1, 2 et 3 »).

Il était important de faire un traitement post-expérimental puisque les courbes acquises contenaient non seulement la déformation du laminé, mais aussi la déformation du système Instron. Ainsi, une courbe avec le même montage, mais sans laminé, était faite pour tenter d'éliminer l'effet du montage sur les mesures. Logiquement, ce qui devait être obtenu, suite à la correction, était l'augmentation graduelle de la force lors de l'aplanissement du laminé et un changement abrupt de comportement au moment où le laminé allait être complètement plat (dans la mesure où le système le permet).

Malgré l'utilisation d'un des détecteurs le plus sensible disponible sur l'appareil, les résultats n'étaient pas suffisamment précis et reproductibles pour permettre des résultats concluants et une technique alternative a dû être développée.

### 3.1.3 TherMoiré

Le TherMoiré utilise les franges d'interférences pour mesurer le gauchissement total du laminé et utilise un environnement fermé pouvant monter en température. Pour effectuer la mesure, une lumière passe à travers un réseau diffractant et est projetée sur l'échantillon

à mesurer produisant un patron d'interférence sur l'échantillon. Dépendamment de la forme du laminé, les franges d'interférence sont plus ou moins distancées les unes des autres et permet une évaluation en hauteur dans l'axe vertical suffisante de chaque point mesuré sur l'échantillon. Puisque la mesure fonctionne par l'acquisition de lumière provenant de l'échantillon, il faut que l'échantillon soit bien visible et une plaque de verre, faisant office de poids, permet tout à fait de voir le laminé et d'appliquer un poids simultanément. La figure 3.4 présente le montage utilisé lors des expériences au TherMoiré.

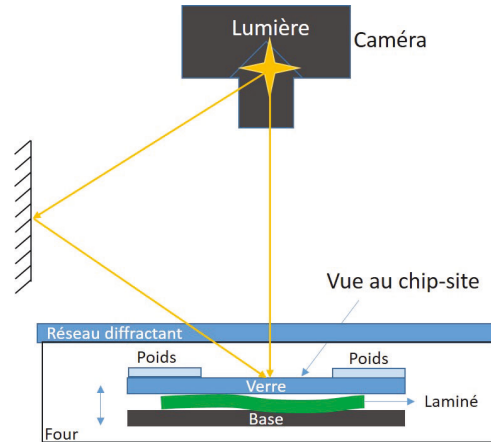


Figure 3.4 Montage utilisé lors des mesures au TherMoiré pour l'évaluation de la force de gauchissement des laminés.

Une autre particularité de la technique de mesure de gauchissement à l'aide du TherMoiré est qu'il est aisé de mesurer le gauchissement à plusieurs températures en une seule expérience contrairement à l'approche par Instron où c'est plutôt la température qui est constante et la pression qui varie. L'arrangement du réseau diffractant combiné au four, que l'on peut voir dans le schéma de la figure 3.4, permet d'ajuster rapidement la température, effectuer une mesure de gauchissement qui prend quelques secondes et changer la température avant de reprendre une nouvelle mesure de gauchissement. La figure 3.5 illustre le type de profil de température que l'on peut obtenir à l'aide du TherMoiré. L'intention ici est d'effectuer une montée et une descente en température de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  par minute, mais les performances du matériel utilisé limitent la vitesse à laquelle le four peut chauffer et limitent aussi la vitesse de refroidissement. Les mesures de gauchissement prises sont toutefois programmées pour être prises à des températures spécifiques et des thermocouples collés sur l'échantillon, ou sur un échantillon sacrificiel, s'assurent que cette température soit atteinte. La température dans le four peut être plus élevée que celle marquée sur le graphique, mais la température importante est ultimement celle directement sur l'échantillon.

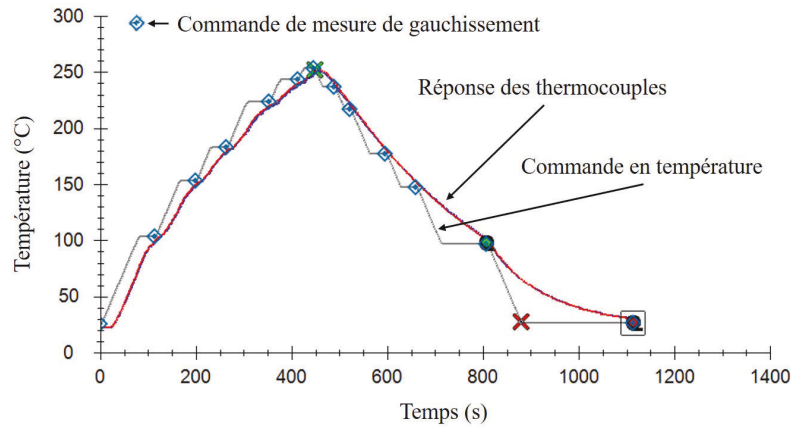
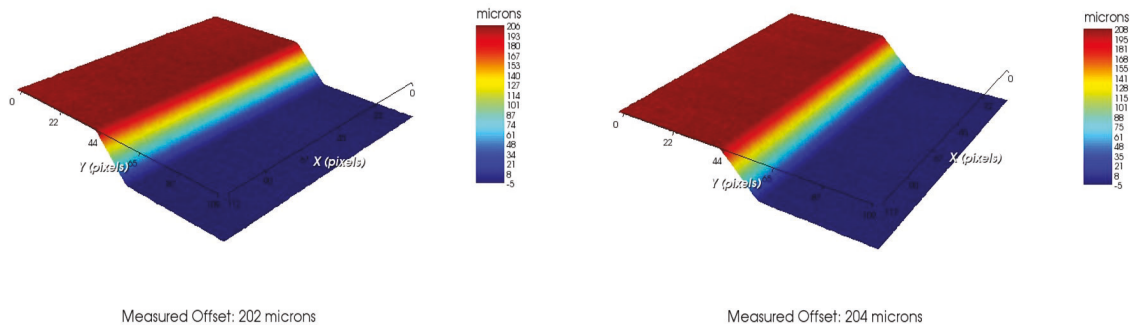


Figure 3.5 Profil de température typique avec le TherMoiré. Diverses fonctions de ventilation passives et actives définies par les « X » rouges et verts permettent un refroidissement plus rapide qu'une simple extinction des éléments chauffants.

Les laminés subissent plusieurs excursions en température et en raison de la sensibilité des laminés à l'humidité, une étape de désorption d'humidité est faite avant chaque excursion en température d'un laminé. Sans cette étape de désorption, des boursouffures causées par l'ébullition de l'eau dans les couches du laminé pourraient apparaître. Ceci fausserait les mesures de gauchissement et rendrait les laminés inutilisables. Une période de 8 heures à une température légèrement plus haute que la température d'ébullition de l'eau, soit 125 °C sous atmosphère d'azote, permet de faire cette désorption sans endommager le laminé.

L'usage d'une plaque de verre peut certainement altérer les mesures de franges d'interférence, particulièrement si les surfaces de la plaque de verre ne sont pas parallèles. Par l'usage de plaques de verre à surfaces non parallèles, les rayons lumineux pourraient diverger ou converger différemment de ce que la surface réelle à mesurer fournit comme signal lumineux. Ici vient l'utilité d'une pièce de référence afin de bien calibrer l'appareil TherMoiré. Cette pièce de référence en métal, mesurée et présentée à la figure 3.6a, est composée de deux plateaux séparés par une distance connue de 203  $\mu\text{m}$ . La valeur mesurée de 202  $\mu\text{m}$  fait partie de la marge d'erreur de l'appareil de  $\pm 1 \mu\text{m}$ . On peut voir à la figure 3.6b l'impact de l'ajout d'une plaque de verre sur la mesure de la pièce de référence avec une nouvelle valeur de 204  $\mu\text{m}$  et en considérant la marge d'erreur de l'appareil, la différence de hauteur entre les deux plateaux est acceptable. Avec cette technique, il est donc possible, en se procurant des verres de différents poids et de taille adéquate, d'évaluer le gauchissement des laminés soumis à une force de contrôle du gauchissement en température.





(a) Mesure de référence sans l'usage de verre ni poids

(b) Mesure avec l'usage d'une plaque de verre

Figure 3.6 Comparaison de mesure de calibration du TherMoiré sur pièce de référence avec et sans usage de plaque de verre.

Quatre poids ont été utilisés en température ambiante, soit 34 g, 73 g, 144 g et 230 g. En dehors du poids de 230 g, les mêmes poids ont été utilisés en température. Il a été possible d'évaluer de cette manière le comportement de trois types de laminés. Le tableau 3.2 permet de faire les comparaisons entre les poids et les pressions selon chaque laminé en considérant leurs différentes tailles.

Tableau 3.2 Pressions correspondant aux poids des verres selon les différents laminés.

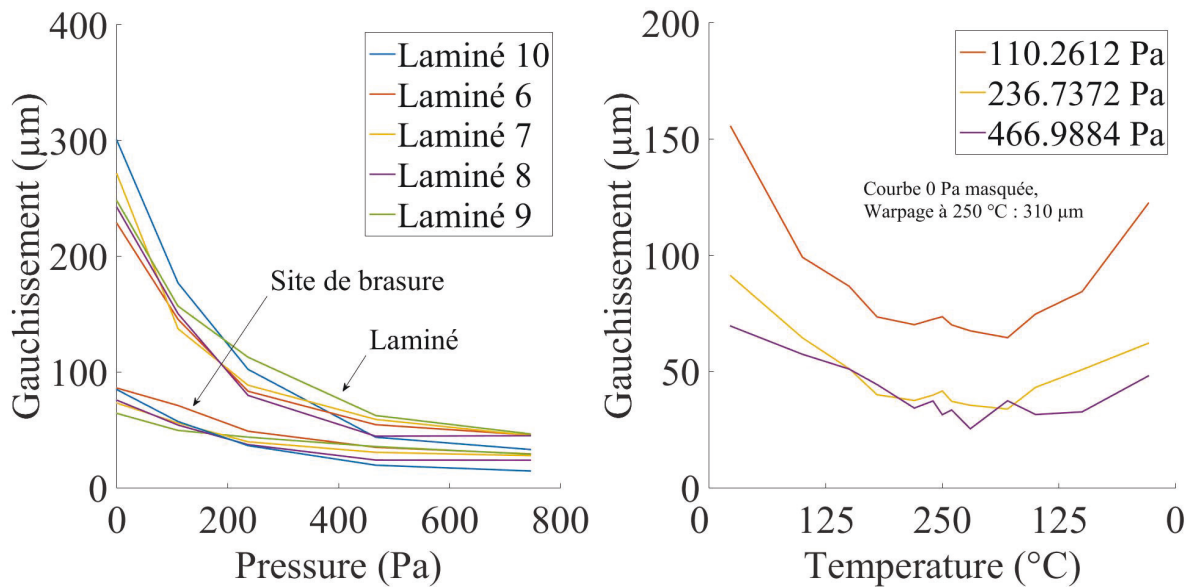
Poids des verres (g)	34	73	144	230
Coreless 55 mm * 55 mm (Pa)	110	237	467	746
CSP 28 mm * 35 mm (Pa)	340	731	1442	2302
Thincore 42,5 mm * 42,5 mm (Pa)	185	397	782	1249

Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 montrent le gauchissement des différents laminés étudiés en fonction de la pression appliquée et de la température. On peut observer, en température, qu'à une certaine pression, il ne semble pas y avoir amélioration dans la réduction du gauchissement des laminés pour les laminés coreless et CSP. On peut associer cela à plusieurs causes dont le gauchissement du montage lui-même. Ainsi, il est possible que des forces supplémentaires soient nécessaires pour minimiser davantage le gauchissement, mais le présent montage ne permet pas cette évaluation plus précise. On peut tout de même conclure que l'application d'une pression, même si faible, améliore de manière considérable le gauchissement des laminés tout autant en température qu'à température ambiante et serait utile pour le procédé de brasage de la puce électronique au laminé. Tandis que les valeurs de gauchissement présentées ici sont en valeur absolue afin de comparer les amplitudes, la nature très peu prédictive du gauchissement des laminés peut donner des comportements



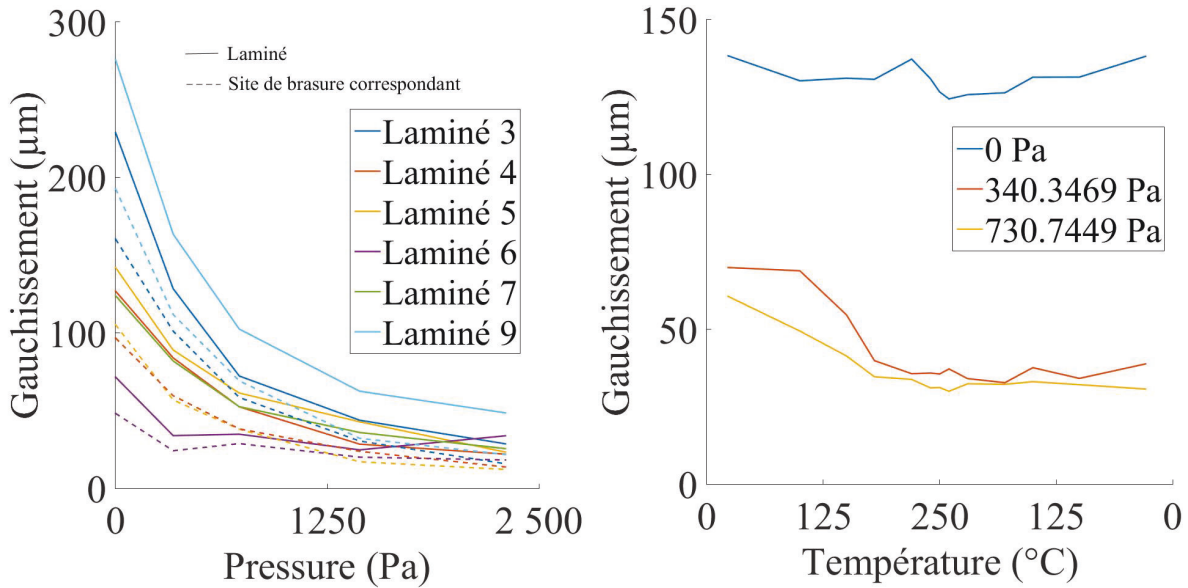
différents ; soit un gauchissement positif défini comme ayant le centre plus élevé que les coins, ou un gauchissement négatif défini comme les coins plus élevés que le centre du laminé, et ce, même si plusieurs autres formes de gauchissement peuvent survenir entre le centre et les coins des laminés (figure 3.10). Bien que les laminés CSP et Thincore n'aient pas de tendance particulière, les laminés coreless ont une très grande tendance à avoir un gauchissement négatif à température ambiante.

Comme une des fonctions principales des cœurs dans un laminé est d'apporter une certaine rigidité et aussi de rapprocher le CET des éléments non conducteurs du laminé à celui du cuivre [19], il est prévisible d'observer de hauts gauchissements pour les laminés coreless. Par contre, vu leur faible rigidité, il est aussi possible d'observer une très grande réduction du gauchissement initial lorsqu'une pression est appliquée. En observant les faibles valeurs de force appliquée sur les laminés coreless, il est possible d'imaginer que le montage utilisé à l'Instron (figure 3.2) rendait potentiellement le laminé déjà plat avant même d'appliquer une force avec l'Instron lorsque les plaques de céramiques étaient déposées sur le laminé. Ceci rendait l'analyse des résultats très difficile, mais l'usage du TherMoiré a facilement permis de contourner cette problématique.



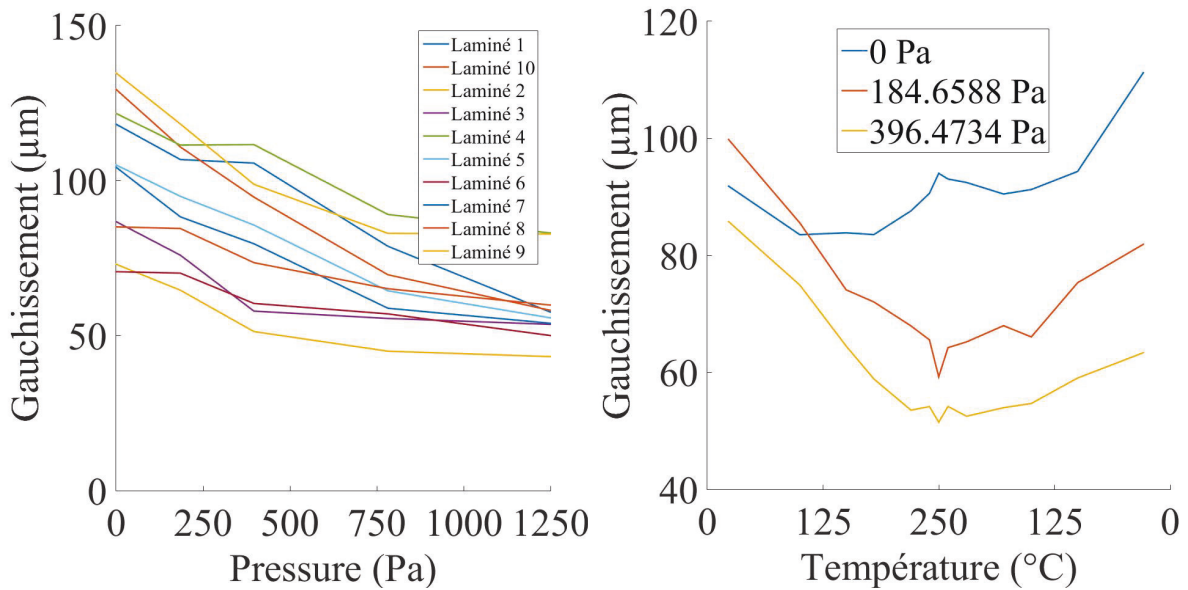
(a) Gauchissement des laminés coreless à température ambiante (b) Gauchissement des laminés coreless en température

Figure 3.7 Gauchissement pour les laminés coreless avec et sans pression appliquée. Le comportement en gauchissement sans pression appliquée, soit la courbe à 0 Pa en b) est masquée afin de mieux différencier les autres courbes du graphique.



(a) Gauchissement des laminés CSP à température ambiante (b) Gauchissement des laminés CSP en température

Figure 3.8 Gauchissement pour les laminés CSP avec et sans pression appliquée.



(a) Gauchissement des laminés thincore à température ambiante (b) Gauchissement des laminés thincore en température

Figure 3.9 Gauchissement pour les laminés thincore avec et sans pression appliquée.

Un des assemblages critiques chez IBM est basé sur les laminés coreless, où la présence de défauts tels que mentionnés dans la section 2.2, est grandement supérieure aux autres types de laminés. Conséquemment, les solutions du projet doivent s'adapter le plus possible aux

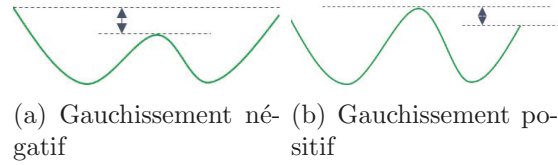


Figure 3.10 Précision sur les gauchissements positifs et négatifs.

laminés coreless, et ce type de laminé a été sélectionné pour tenter d'optimiser le projet. De plus, comme leur gauchissement initial est généralement plus élevé que les autres types de laminés présentés et que de plus faibles forces sont requises pour rendre les laminés plats, les optimisations devraient être facilement observables sur le gauchissement résultant.

## 3.2 Identification des adhésifs

Pour limiter la quantité d'adhésifs à tester, une recherche a été faite à travers la littérature pour retenir les meilleurs candidats potentiels. Les zones de recherche ont principalement été les différents manufacturiers d'adhésifs utilisés dans la manipulation de tranches de silicium, les conférences et les publications scientifiques. Les points importants pour la sélection d'adhésif étaient la compatibilité chimique avec les matériaux et procédés utilisés par *IBM-Bromont*, la température de cuisson des adhésifs pour l'étape de collage au support temporaire, la stabilité mécanique en température et la possibilité de décollage et nettoyage des adhésifs.

Plusieurs adhésifs ont été identifiés et sont présentés au tableau 3.3. À l'exception du BB220, ils peuvent tous être utilisés à des températures supérieures ou égales à 250 °C. Cette limite inférieure est très importante puisque la température de brasage de la puce électronique peut aller jusqu'à 250 °C pour assurer que toutes les brasures soient bien au-dessus de leur température de fusion, soit environ 217 °C pour SnAgCu, et soient donc bien liquides pour assurer le mouillage des interconnexions.

Tableau 3.3 Présentation des adhésifs trouvés ayant une stabilité thermique égale ou supérieure à 250 °C. (\*) La polymérisation complète se fait à une température d'au moins 280 °C selon le manufacturier, mais peut se faire partiellement à plus basse température.

Adhésifs	Brewer Science		Micromaterials		Master Bond	HD Microsystems	Chemtronics
	Brewer Bond 305	Brewer Bond 220	Z-Bond 510	Z-Bond 601	MB 600	HD 3007	Chemask Aqua
Élément chimique	Organique	Organique	Base de solvant	Silice	Silicate de sodium	Polymère	Organique
Température max. d'opération (°C)	300	240	400	250	816	350	268
Température de collage (°C)	200	130	300	150	205	280 *	50
Nettoyage	ZoneBond	Bond Remover	Z-Clean 811	Z-Clean 901	Eau	EKC830	Eau

Une pression et généralement une haute température sont requises pour procéder au collage d'un échantillon sur un support temporaire à l'aide d'un adhésif. Il est difficile de penser qu'un tel procédé ne sera pas dommageable pour les *chip bumps* à des températures supérieures à 217 °C. Ainsi, le *Z-Bond 510* de *Micromaterials* n'est pas un bon candidat puisque la température à laquelle il faut coller l'échantillon est de 300 °C et cet adhésif est donc éliminé. Selon les valeurs observées dans le tableau, le HD3007 serait aussi un adhésif à éliminer, mais quelques études présentent une efficacité de l'adhésif à des températures de collage aussi basses que 200 °C [65] qui est une température acceptable pour l'application envisagée. Selon ces mêmes études, l'adhésif semble de plus en plus fort

lorsque la température de collage s'approche de 250 °C, mais perd de son efficacité si cette température s'approche de 300 °C. Des tests de collage à des températures supérieures à 200 °C pourraient donc être pertinents à faire tout en prenant soin d'étudier la forme et l'état des *chip bumps* après collage.

Dans le cas du BB220, sa température d'opération maximale de 240 °C [66] implique une transition vitreuse de ce thermoplastique vers sa phase liquide en-dessous de la température maximale de fournaise d'environ 250 °C et rend son comportement trop imprévisible pour le sélectionner. Cependant, le BB305 du même fournisseur, ayant une température maximale d'opération de 300 °C, semble plus adapté aux températures visées dans ce projet.

Selon l'historique de la compagnie *IBM-Bromont*, certains chimiques utilisés sur les puces électroniques et les laminés sont plutôt indésirables. Il y a entre autres tous les adhésifs à base de silicone qui posent problème. Ainsi, les adhésifs tels que le *Z-Bond 601* de *Micromaterials* et le *MB600* de *Master Bond* ne sont pas souhaitables non plus pour ce projet de recherche.

De plus, la solubilité d'un adhésif dans l'eau est quelque peu problématique pour *IBM-Bromont* puisque le laminé et la puce électronique passent à travers plusieurs étapes de nettoyage. En plus de ne pas pouvoir maintenir son pouvoir d'adhésion, la dissolution de l'adhésif dans l'eau utilisée pour le nettoyage risque de rendre l'eau de nettoyage inutilisable pour sa tâche principale.

Ainsi, de la liste des adhésifs présentés au tableau 3.3 il reste deux adhésifs retenus pour ce projet :

- L'adhésif Brewer Bond 305 (le BB305) et son solvant de Zone Bond Remover à base de D-Limonène [67]
- L'adhésif HD3007 dont le solvant doit contenir du N-méthyl pyrrolidone (NMP), ici le EKC830 et le EKC865 [64]

### 3.3 Identification, design et construction des supports temporaires

Les deux points les plus importants à considérer pour le support temporaire sont le coefficient d'expansion thermique (CET) et sa rigidité. Pour ce qui est du CET, une différence par rapport au laminé pourrait induire des contraintes supplémentaires pouvant entraîner un gauchissement supplémentaire, ou même empêcher le laminé d'être solidement fixé

---

au support temporaire. Quant à la rigidité du matériau du support temporaire, celle-ci définira l'épaisseur optimale du support temporaire.

L'épaisseur des supports temporaires est très importante pour ne pas faire en sorte que le support soit la cause du gauchissement du laminé. Puisqu'une pression est requise afin de faire l'étape de collage du laminé au support temporaire, il est possible que le support se déforme sous la pression appliquée. La loi sur la déflexion  $w$  de plaque de *Kirchoff-Love* a été utilisée et peut être décrite par les expressions 3.1, 3.2 et 3.3.

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi^4 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{mn}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (3.1)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3.2)$$

et

$$a_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^b \int_0^a q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (3.3)$$

où

- $D$  est la rigidité flexurale (« *flexural rigidity* »)
- $E$  est le module d'Young
- $t$  est l'épaisseur parallèle à l'axe  $z$
- $\nu$  est le ratio de Poisson
- $a$  et  $b$  sont les dimensions de la plaque dans le plan  $xy$
- $a_{mn}$  est un coefficient de Fourier
- $q(x, y)$  est la pression appliquée au point  $(x, y)$

La situation où le support temporaire est soutenu uniquement par sa périphérie est considérée pour évaluer la moins bonne condition de collage possible.

La figure 3.11 présente la déformation de certains supports temporaires de matériau typique si l'on applique une pression équivalente à 500 grammes sur la surface totale du laminé. Bien qu'une pression supérieure est recommandée par les fabricants, cette valeur est amplement suffisante pour aplanir le laminé si l'on se fie à la section 3.1. La valeur de déflexion acceptable a été définie comme 1  $\mu\text{m}$  de déflexion et il est possible d'être sous cette valeur de déformation avec 1,08 mm d'acier inoxydable, 1,48 mm d'aluminium et

1,69 mm de verre. Bien que les métaux soient plus appropriés à la présente application lorsque les CET des supports temporaires sont utilisés, il peut toujours être utile de considérer le verre comme support temporaire dans certains cas puisque la procédure de collage et décollage peut, dans certains cas, s'effectuer par laser UV [68, 69].

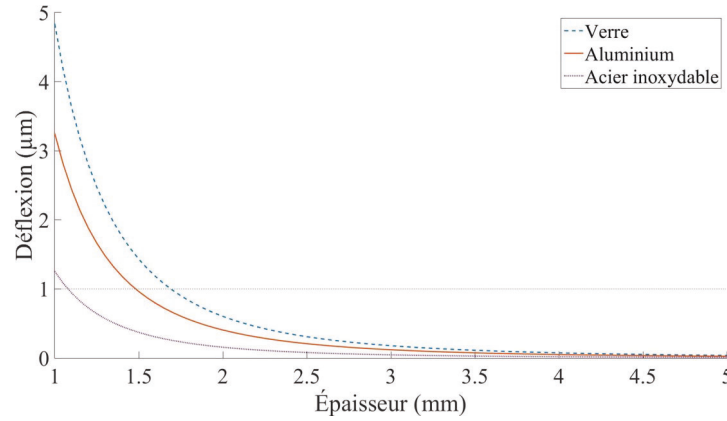


Figure 3.11 Déflexion calculée des supports temporaires non perforés avec pression uniforme.

Pour des raisons d'efficacité de cuisson de l'adhésif HD3007 et pour considérer l'option de dissolution chimique, un design avec perforations a été proposé comme présenté à la figure 3.12.

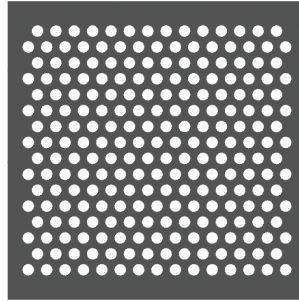


Figure 3.12 Design de support temporaire avec trous de 2,5 mm espacés de 1,5 mm.

Cette modification apporte certainement des modifications aux propriétés mécaniques des matériaux utilisés. Le comportement mécanique de perforations en patron triangulaire a la particularité d'être isotropique [70]. Conséquemment, les propriétés mécaniques, telles que le module d'Young, ne devraient pas être modifiées selon le sens de la charge appliquée, bien qu'elles seront plus faibles qu'un même matériau non perforé. Selon [70], en considérant les dimensions et espacement des trous, mais aussi en assumant que les caractéristiques du support temporaire ne varient pas de manière trop importante en modifiant son épaisseur,

il est possible d'évaluer que le module d'Young effectif est en fait environ 32 % du module d'Young initial et que le nouveau ratio de Poisson est de  $\nu = 0,34$ . La figure 3.13 présente la déflexion de plaques d'aluminium et d'acier inoxydable perforées selon la configuration de la figure 3.12. On observe que selon ce design, pour assurer une déformation maximale de  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 1,54 mm d'acier inoxydable et 2,12 mm d'aluminium seront nécessaires.

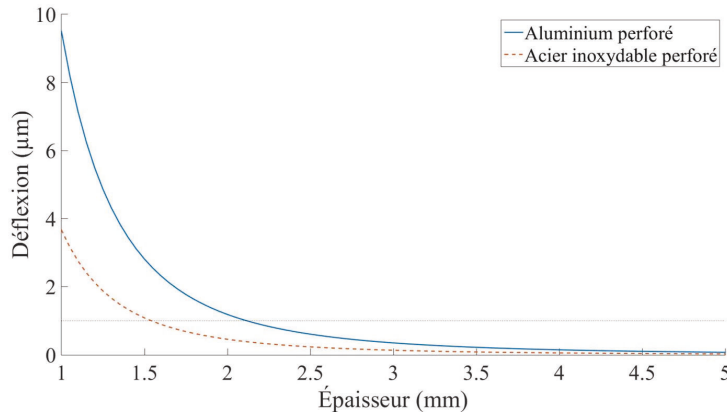


Figure 3.13 Déflexion calculée des supports temporaires perforés avec pression uniforme.

La zone d'application de la pression est aussi un élément important à garder en tête lors du collage des pièces. La zone critique où il est nécessaire de maintenir le laminé plat est le site de brasure. Un collage en appuyant dans cette région peut donc assurer un bon contact de l'adhésif dans la région du site de brasure, mais permet aussi de bien aplanir cette région. Ainsi, la figure 3.14 présente la déflexion de différents matériaux lorsqu'une pression est appliquée uniquement dans la région du site de brasure. Une épaisseur minimale de 2,80 mm d'aluminium perforé, 2,24 mm de verre et 2,04 mm d'acier inoxydable perforé permet ultimement d'être sous la barre de  $1\text{ }\mu\text{m}$  de déformation lorsque la charge de collage est appliquée. Tandis que l'acier inoxydable et le verre parviennent à réduire l'épaisseur nécessaire pour être sous la barre de  $1\text{ }\mu\text{m}$  de déflexion, plusieurs points encouragent l'utilisation de l'aluminium. En premier lieu, le CET de l'aluminium (23,6 ppm/K pour l'aluminium 6061-T6) s'apparente beaucoup plus à celui des laminés coreless (20 ppm/K) par rapport aux autres matériaux. De plus, l'aluminium nécessaire correspond à une masse moins grande que celle d'un support en acier inoxydable, soit 23,5 grammes d'aluminium versus 47,1 grammes pour l'acier inoxydable le plus léger et peut donc limiter la charge thermique supplémentaire lors du brasage. Ultimement, l'aluminium 6061-T6 sera utilisé pour les tests subséquents, et ce avec une épaisseur de 5 mm. Cette épaisseur a été sélectionnée afin de s'assurer de la force suffisante de l'aluminium au cas où certains facteurs n'avaient pas été considérés.



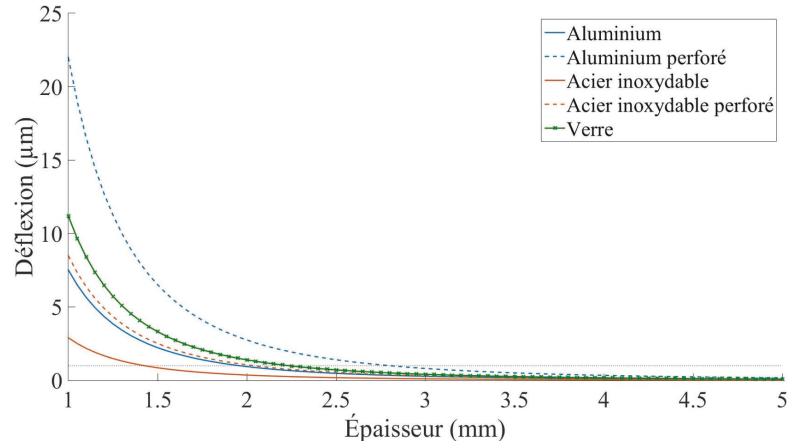


Figure 3.14 Déflexion calculée des supports temporaires perforés avec pression directement sur site de brasure.

Suite à l'évaluation de l'épaisseur minimale du support temporaire, il peut être pertinent d'étudier les contraintes de cisaillement générées entre le laminé et le support temporaire puisque ces contraintes peuvent signifier du gauchissement supplémentaire. Le tableau 3.4 présente le CET des différents laminés étudiés ainsi que celui des matériaux potentiellement compatibles aux CET des laminés. Bien qu'utiles à mentionner puisqu'il est possible de voir que des matériaux à CET similaires aux laminés existent, les matériaux disponibles ont limité les choix à l'aluminium 6061-T6 dont le CET est 23,6 ppm/K.

Tableau 3.4 Coefficients d'expansion thermique de différents laminés étudiés et des matériaux de support temporaires potentiels.

	Coefficient d'expansion thermique (ppm/K)	Matériel potentiel et coefficient d'expansion thermique (ppm/K)
Laminé thincore	17,1	Al1206, CET = 17,3
Laminé CSP	14	SS310, CET = 14,4
Laminé coreless	20	Al1208, CET = 19,8

Plusieurs théories permettent d'approximer les contraintes que l'on peut retrouver à l'interface entre deux matériaux de CET différents et liés par un troisième matériau ayant aussi des propriétés mécaniques différentes. Ainsi, avec la connaissance des propriétés mécaniques des trois entités utilisées, il est possible d'évaluer les contraintes en jeu dans un assemblage [71]. L'approximation utilisée ici est basée sur l'usage de deux couches circulaires collées ensemble par un adhésif. Elle fait intervenir les coefficients d'expansion thermique des couches, les modules d'Young, les ratios de Poisson et les épaisseurs des couches et l'épaisseur et le module de cisaillement de l'adhésif utilisé. On peut représenter la contrainte  $\tau$  générée par les expressions 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 [71].

$$\tau = \frac{2(\alpha_1 - \alpha_2)TG}{\eta\beta(C_1 + C_2)} I_1(\beta r). \quad (3.4)$$

$$\beta^2 = \frac{G}{\eta} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1 t_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2 t_2} \right). \quad (3.5)$$

$$C_1 = -\frac{2}{1 + \nu_1} \left[ \frac{1 - \nu_1}{\beta R} I_1(\beta R) - I_0(\beta R) \right]. \quad (3.6)$$

$$C_2 = -\frac{2}{1 + \nu_2} \left[ \frac{1 - \nu_2}{\beta R} I_1(\beta R) - I_0(\beta R) \right]. \quad (3.7)$$

où

- $\alpha_i$  est le CET du matériau  $i$
- $T$  est le changement de température
- $G$  est le module de cisaillement de l'adhésif
- $\eta$  est l'épaisseur de l'adhésif
- $I_i$  est la fonction de Bessel modifiée d'ordre  $i$
- $r$  est la distance à partir du centre de l'assemblage

Le tableau 3.5 présente les propriétés des différents matériaux utilisés pour évaluer les contraintes en jeu et considère deux matériaux différents comme support potentiel, soit l'aluminium et le verre où ce dernier est un choix populaire pour le décolage par laser UV. Les épaisseurs d'adhésif ont été choisies selon les recommandations minimums des fournisseurs.

Tableau 3.5 Propriétés mécaniques nécessaires à la résolution du système d'équations.

	Laminé	Aluminium	Verre	HD3007	BB305
Module d'Young	130 MPa	69 GPa	72 GPa	-	-
CET	20 ppm/K	23,6 ppm/K	0,55 ppm/K	-	-
Ratio de poisson	0,4	0,32	0,15	-	-
Épaisseur	0,42 mm	5 mm	6,4 mm	2 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
Module de cisaillement	-	-	-	40 MPa	8 MPa

Basé sur ces valeurs, en considérant que la dimension maximale des laminés de 55 mm sur 55 mm se trouve à un des coins du laminé, soit  $(2 * 55 \text{ mm})^{1/2} = 38,89 \text{ mm}$  du centre du laminé, on retrouve au tableau 3.6 les contraintes maximales selon les différents adhésifs

et supports temporaires. Ces valeurs assument que tous les éléments restent solidement attachés les uns aux autres. Selon ces calculs, il est aisé de voir que le verre induit des stress beaucoup plus grands que l'aluminium et ceci est grandement dû à la grande différence de CET entre le laminé et le verre. De plus, le module plus faible du BB305 permet un stress beaucoup plus faible que ce que le HD3007 permet. De ces valeurs, il est possible de comprendre que le couplage entre le laminé et le support temporaire sera beaucoup plus important avec le HD3007 que le BB305. Ceci peut signifier que le laminé bénéficiera beaucoup plus de la rigidité fournie par le support temporaire lorsque le HD3007 est utilisé et pourrait plus facilement réduire le gauchissement du laminé si le collage est adéquat entre le support temporaire et le laminé et si les contraintes sont minimisées.

Tableau 3.6 Contrainte maximale en valeur absolue à l'interface entre le support temporaire et le laminé coreless.

(valeurs en kPa)	HD3007	BB305
Aluminium	558	112
Verre	2808	562

Comme mentionné précédemment, il peut être utile dans certains cas d'utiliser une plaque de verre afin de procéder au décollage par laser UV, mais le CET du verre reste problématique. Il est toutefois possible d'utiliser des verres à haut CET qui peuvent se comparer au CET de laminés [72, 73]. Par contre, les verres ayant la meilleure transmittance sont des verres composés uniquement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) qui permet une bonne transmittance dans le visible, mais aussi dans l'ultraviolet jusqu'aux longueurs d'onde de 160 nm à 180 nm pour une épaisseur de 1 mm [74]. L'ajout de composants dans le verre, généralement utilisé pour augmenter le CET du verre, peut facilement faire varier la transmittance des rayons ultraviolets et ainsi diminuer l'intérêt d'utiliser le verre comme support temporaire. Qui plus est, la transmittance peut être adéquate pour de faibles épaisseurs de verre à haut CET, mais il est possible que l'épaisseur nécessaire dans l'application présente (2,24 mm selon la figure 3.14) soit trop grande pour permettre une transmittance des rayons ultraviolets adéquate. Une future investigation à ce sujet pourrait être pertinente. Des tests de collage impliqueront tout de même des supports en aluminium et des supports en verre avec les deux types d'adhésif. Ceci permettra d'observer l'impact de la rigidité des différents éléments collés ensemble pour contrôler le gauchissement des laminés.

## 3.4 Technique d'étalement des adhésifs

Afin de pouvoir mettre à l'épreuve les différents adhésifs, il faut s'assurer d'utiliser une technique d'étalement reproductible pour limiter les variables pouvant influencer leur qualité d'adhésion autant pour les tests mécaniques effectués sur les adhésifs que pour le collage des

laminés au support temporaire. Plusieurs techniques ont été expérimentées pour identifier l'étalement ayant la plus faible variabilité d'un étalement à l'autre.

### 3.4.1 Étalement par vaporisation

L'étalement par vaporisation est une technique où l'adhésif doit être dissout, si trop visqueux, pour ensuite être étalé à l'aide d'une tête de titane vibrant à des fréquences ultrasoniques. La figure 3.15 présente les étapes permettant l'étalement par vaporisation. Avant leur application sur un échantillon, les adhésifs baigent généralement dans un solvant (différent selon le fabricant et le type d'adhésif). L'ajout supplémentaire de solvant peut réduire la densité de l'adhésif en modifiant de manière minime le processus de cuisson de l'adhésif. Cette diminution de densité permet sa vaporisation avec l'énergie fournie par les ultrasons de la tête en titane.

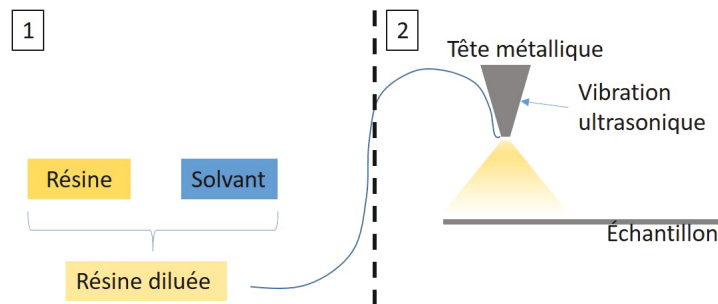


Figure 3.15 Étapes d'étalement d'adhésif par vaporisation.

Une telle technique permettrait un étalement rapide sur plusieurs unités par minute, mais nécessite plusieurs ajustements. La quantité de variables devant être contrôlées afin d'obtenir un étalement uniforme est plutôt grande :

- Degré de dilution de l'adhésif
- Hauteur de la tête métallique
- Vitesse de déplacement de la tête métallique
- Pression d'air pour la dispersion du jet vaporisé
- Quantité d'adhésif fourni à la tête métallique par unité de temps
- Le patron d'étalement (zigzag, de gauche à droite, de haut vers le bas, zone d'étalement, nombre de repassages, etc.)

Ces paramètres peuvent grandement varier et le résultat d'étalement peut conséquemment varier facilement si l'une de ces variables change quelque peu.

Après avoir vérifié que les adhésifs et solvants utilisés n'endommageaient pas la tête de titane, il était nécessaire de réduire la viscosité des adhésifs. En effet, les ultrasons générés par la tête de titane ne sont pas suffisamment forts pour vaporiser les adhésifs. Un test

de dilution sur le BB305 a permis de faire un étalement sur échantillon d'aluminium. La figure 3.16 montre le type de résultat possible avec l'étalement par vaporisation une fois que le solvant a été évaporé. Des plaques de métal ont été utilisées afin de limiter l'usage de laminés pendant la période d'optimisation de l'étalement et cuisson des adhésifs. La grande quantité de solvant ajoutée lors de la dilution a laissé l'épaisseur de l'adhésif très variable sur toute la surface de la pièce en raison des mouvements de convection augmentés par la quantité supplémentaire de solvant.

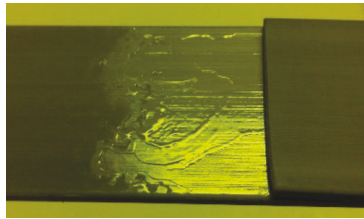


Figure 3.16 Test d'étalement d'adhésif par vaporisation. Trois passages en « zigzag » ont été faits sur la pièce de gauche avant de cuire l'adhésif et le coller à la pièce de droite. Un décollage manuel a été effectué pour observer le contact des pièces

Malgré qu'il serait possible d'optimiser le processus d'étalement par vaporisation, le temps requis pour faire cette optimisation peut être très grand. Ainsi, en raison du temps d'optimisation, cette technique a été laissée de côté en faveur d'autres techniques disponibles.

### 3.4.2 Étalement par aiguille de précision Nordson

Cet appareil grandement utilisé chez IBM est principalement utilisé pour étendre l'underfill entre la puce et le laminé et le matériau d'interface thermique (*thermal interface material*, soit le TIM) entre la puce électronique et le capot. Comparativement à l'étalement par vaporisation, le contrôle de l'étalement par aiguille de précision possède beaucoup moins de variables à contrôler. Par exemple, il n'est pas nécessaire dans ce cas de diluer les adhésifs pour procéder à l'étalement, ce qui permet immédiatement de conserver une meilleure uniformité de l'adhésif vu les proportions plus comparables de solvant et d'adhésif contenu dans les différents adhésifs. La figure 3.17 présente le principe de fonctionnement d'étalement par aiguille de précision. Comme son nom l'indique, il est possible de faire un étalement très précis, soit de l'ordre du micromètre si nécessaire, d'un patron sur un échantillon. La figure 3.18 présente un exemple d'étalement possible en forme d'étoile avec les dimensions extérieures d'un laminé coreless. L'adhésif est acheminé à une petite chambre dans l'objet « étaleur » contenant une vis sans fin qui permet d'étendre une mince couche d'adhésif à la base de l'étaleur sur l'échantillon.

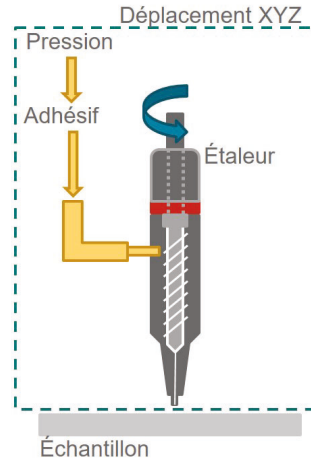


Figure 3.17 Schéma présentant le principe de fonctionnement d'étalement par aiguille de précision.

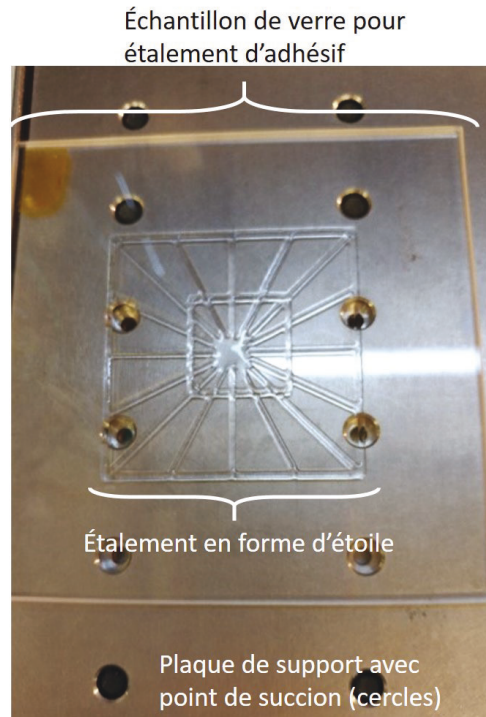


Figure 3.18 Étalement en forme d'étoile avec dimensions extérieures égales à celles du laminé coreless.

La pression utilisée ici doit être telle que lorsque la vis sans fin ne tourne pas, l'arrivée de l'adhésif est pratiquement nulle. Ainsi, l'étalement est facilement contrôlé par la vis sans fin lorsqu'elle tourne. Une fois la pression ajustée, en effectuant quelques tests rapides d'étalement préliminaires, l'étalement peut facilement être programmé par le logiciel de l'appareil. En effet, en prenant un tracé de l'aiguille simple tel qu'une ligne à étaler, la

vitesse de rotation de la vis sans fin et la vitesse de déplacement de l'épaleur doivent être tel qu'un trait d'adhésif uniforme est produit sur l'échantillon. Si le trait étalé s'amincit ou est manquant par endroit, la vitesse d'étalement est trop grande alors que si le trait étalé se trouve à être plus large que l'aiguille de l'épaleur, la vitesse de déplacement n'est pas suffisante. Une règle acceptée pour cet appareil est que la hauteur de l'aiguille de l'épaleur par rapport à l'échantillon définit approximativement l'épaisseur de l'étalement directement (si l'aiguille est à 50  $\mu\text{m}$ , l'épaisseur de l'étalement aura 50  $\mu\text{m}$ ) et un senseur de hauteur et une caméra est intégré à l'appareil pour s'assurer de bien positionner l'aiguille. Suite à ces ajustements, il ne reste qu'à sélectionner le patron d'étalement à l'aide de la caméra.

En observant la figure 3.19, on peut voir que le film déposé peut être beaucoup plus uniforme que le film déposé par vaporisation.

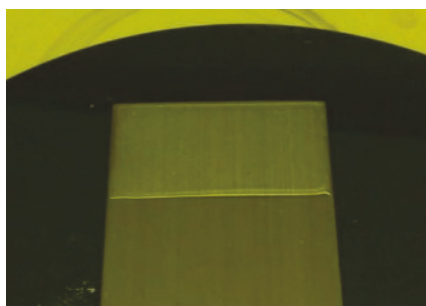


Figure 3.19 Échantillon ayant un film déposé par aiguille de précision.

Bien que l'étalement par aiguille de précision soit une technique rapide et précise, elle ne peut pas être utilisée avec tous les adhésifs souhaités dans l'environnement présent. En effet, comme l'appareil n'est présentement pas ventilé, les vapeurs des adhésifs ne sont pas contrôlées et évacuées comme pourrait le faire une hotte chimique. Conséquemment, des adhésifs tels que le HD3007 qui a un solvant plutôt toxique n'est pas permis sur l'appareil et nécessite l'usage d'une autre technique pour son étalement. L'étalement manuel a été une option de recours. Des travaux futurs employant une aiguille de précision pour étaler le HD3007 seraient par contre pertinents.

Il peut y avoir une plus ou moins grande accumulation dans les différentes régions d'étalement dépendamment de la quantité d'adhésif étendu, surtout si les échantillons contiennent des trous. Cette variation peut compromettre les étapes subséquentes au collage en raison de l'épaisseur variable d'adhésif et générer des zones où de l'adhésif est en trop grande quantité, mais aussi des zones où l'adhésif peut être manquant ou insuffisant. Dans ces deux cas, cela peut signifier une variation indésirable de gauchissement du laminé puisqu'il est soit libre de mouvement en l'absence d'adhésif, soit contraint de bouger sous l'influence

du comportement de l'adhésif en trop grande quantité, lorsque soumis à des températures élevées.

### 3.4.3 Étalement par tournette

Pour tenter de compenser ce manque d'uniformité dans la région du site de brasure et avoir un environnement de travail sécuritaire, l'étalement par tournette a été étudié. Comme les adhésifs retenus sont orientés pour manipuler des tranches de silicium, les tournettes sont souvent utilisées et cette dernière option sera aussi utilisée dans le présent projet. La figure 3.20 schématise bien l'appareil permettant de faire l'étalement par tournette.

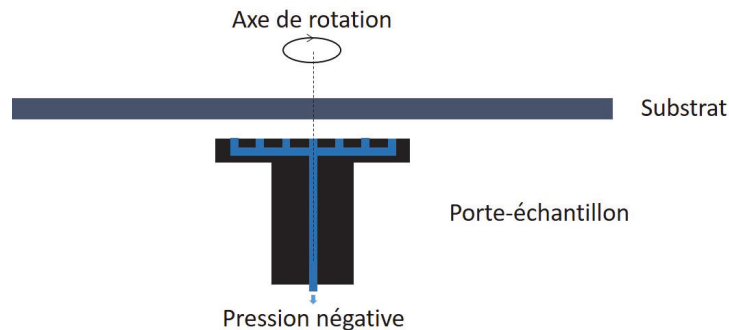


Figure 3.20 Schéma d'une tournette pour étalement de résine avec pression sous vide pour maintenir le substrat (échantillon).

Une fois l'échantillon positionné sur le porte échantillon, une grande quantité d'adhésif est déposée sur l'échantillon afin de bien recouvrir la surface totale à couvrir par l'adhésif. La rotation de l'échantillon élimine ensuite la partie superflue de l'adhésif pour ne laisser qu'une mince couche très uniforme en centre de l'étalement, mais dont les côtés sont affectés par les effets de bord. En effet, comme le présente la figure 3.21, l'adhésif étalé passe par plusieurs états lors du processus d'amincissement de l'adhésif. Initialement, la quantité d'adhésif laisse une surface plutôt uniforme, mais l'épaisseur de l'adhésif est beaucoup trop grande et pourrait difficilement empêcher les laminés de gauchir vu les mouvements potentiels dans l'épaisseur de l'adhésif lors de changements de température. En débutant les rotations, la majeure partie de l'adhésif se dirige vers la périphérie de l'échantillon tout en amincissant le centre du dépôt. Après quelques rotations, le dépôt est déjà beaucoup plus mince, mais manque beaucoup d'uniformité et requiert plusieurs centaines de rotations pour uniformiser la majeure partie du dépôt. La périphérie conserve une épaisseur supérieure au reste de l'étalement comme mentionné précédemment. La forme carrée de l'échantillon vient donner une épaisseur encore plus importante d'adhésif dans ces régions [75]. On assume que l'étalement est suffisamment uniforme dans la région du site de brasure où l'on désire que la planéité soit optimale et que l'impact des effets de



bord peut être compensé par l'application de pression lors du collage des échantillons les uns aux autres.

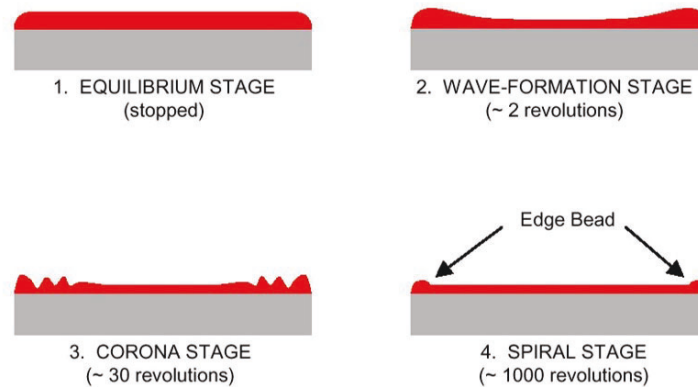


Figure 3.21 Comportement de l'adhésif déposé au cours des différents stades d'étalement lors la rotation de l'échantillon sur tournette [76].

Ici, deux techniques ont été expérimentées. Des étalements par tournette sur le support temporaire ont été effectués, mais des tests ont aussi été faits en effectuant l'étalement par tournette directement sur le laminé avant de faire le collage du laminé au support temporaire en raison du design contraignant du support temporaire, lorsque perforé (figure 3.12).

Dans les deux cas, la tournette utilisée se servait d'une pression sous vide sur le porte-échantillon afin de maintenir en place le substrat qui allait recevoir l'étalement. Dans les cas d'une tranche de silicium, la faible rugosité de surface permet un sceau très efficace entre le porte-échantillon et la tranche, mais une plaque de métal contient habituellement plus de défauts de surface et sa rugosité de surface ne permet pas un sceau aussi efficace, tout comme un laminé qui comporte des *chip bumps*. Un sceau adéquat peut être obtenu en utilisant un ruban adhésif de kapton à l'endroit où l'on désire tenir le support temporaire, ou le laminé. De plus, dans le cas du laminé, comme on désire faire l'étalement sur le dessous du laminé (« bottom side module », soit BSM), il faut tenir le laminé du côté où du site de brasure (« top side module », soit TSM) à l'aide du porte-échantillon et un ruban adhésif de kapton positionné sur la région du site de brasure permet non seulement de maintenir un bon sceau pour l'étalement, mais protège aussi le site de brasure contre toute impureté qui aurait pu se déposer sur le porte-échantillon par des dépôts précédents. Une inspection visuelle suite à l'étalement assure l'absence de résidus sur le site de brasure.

Des tests d'évaluation de l'épaisseur des adhésifs dans la région du site de brasure ont été tentés une fois que le laminé était collé au support temporaire. L'hypothèse était qu'une technique utilisant une mesure d'épaisseur par laser simultanément sur le laminé et sous le support temporaire permettrait d'évaluer l'épaisseur de l'adhésif en soustrayant à la valeur mesurée les épaisseurs connues du laminé et du support temporaire. Bien que logique en soi, les mesures se sont avérées inutiles puisque les variations d'épaisseur étaient principalement causées par le support temporaire et non par le laminé comme le montre la figure 3.22 où un échantillon typique de ce qui était mesuré est montré. La variation de hauteur mesurée sur le site de brasure était très faible par rapport à la variation de hauteur mesurée du côté du support temporaire et empêchait d'évaluer convenablement l'épaisseur de l'adhésif dans la région du site de brasure. Il serait possible d'effectuer des mesures infrarouge en substituant le support temporaire par une tranche de silicium dans des travaux futurs puisque les tranches de silicium sont transparentes aux rayonnements infrarouges [77].

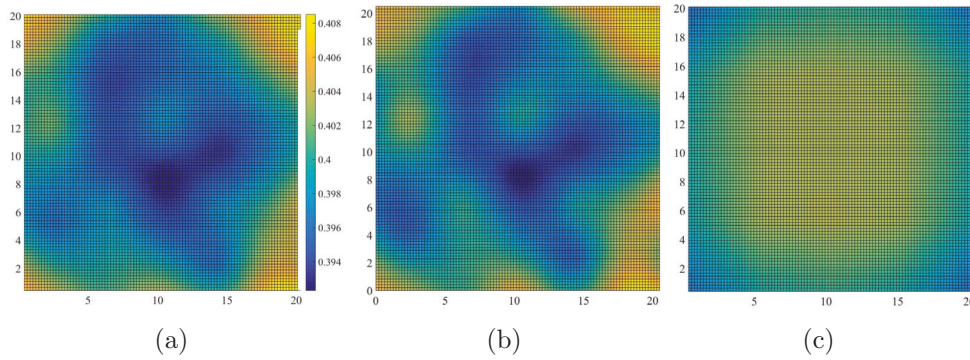


Figure 3.22 Tentative d'évaluation d'épaisseur de l'adhésif dans la région du site de brasure par mesure non destructive. (a) Combinaison de la mesure du support temporaire en (b) et de la mesure du site de brasure en (c). L'échelle en (a) combine l'épaisseur du laminé de 420  $\mu\text{m}$  et de la présence potentielle d'adhésif. L'axe des X et des Y représente la surface de la puce électronique de 20,5 x 20,5 mm.

### 3.5 Processus de cuisson et collage de laminés aux supports temporaires

Les deux adhésifs sélectionnés ont des recettes différentes. Le BB305 doit passer par une étape de cuisson qui précède l'étape de collage des échantillons ensemble, alors que le HD3007 combine l'étape de cuisson et de collage. Initialement, comme il est préférable de limiter l'usage des laminés pour les premiers tests pour limiter le gaspillage, les premières tentatives ont été faites sur des pièces de métal. Le nettoyage des échantillons à l'acétone était fait avant chaque étalement. La réutilisation des échantillons était possible grâce aux solvants fournis avec les adhésifs qui permettaient leur dissolution complète. Un montage tel que présenté à la figure 3.23a a été utilisé pour coller les échantillons ensemble une fois rendus à l'étape de collage. La zone de collage est définie ici comme étant 25,4 mm par 12,7 mm sauf avis contraire. Les différents montages utilisés pour faire le collage des laminés aux supports temporaires sont présentés aux figures 3.23b, 3.23c et 3.23d. L'usage des plaques de verre positionnées entre le laminé et le poids prévient le poids métallique de se souder aux *chip bumpss* du laminé.

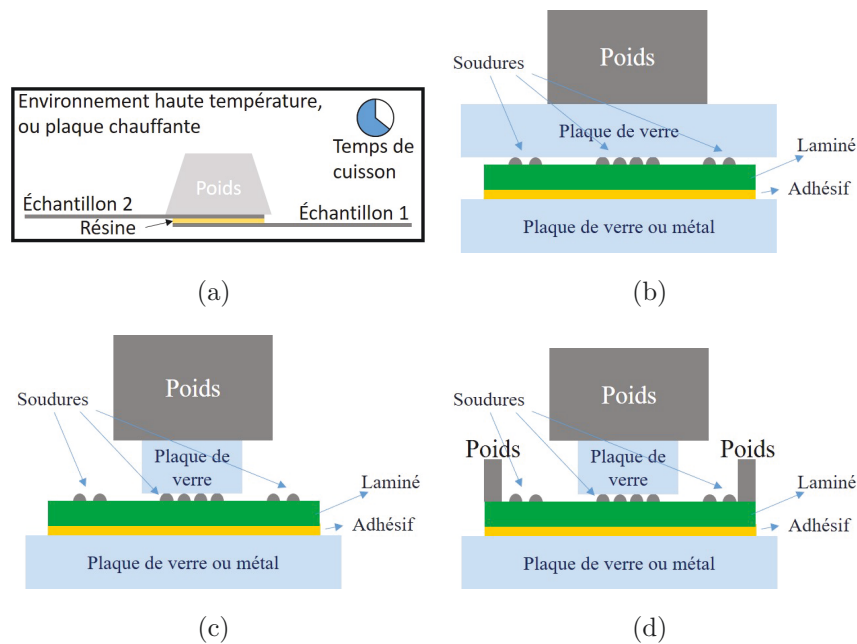


Figure 3.23 Montages pour collage des échantillons à l'aide des adhésifs.

Bien que pour les applications se servant de tranches de silicium il soit vital que le collage se fasse sous vide, ce qui est d'ailleurs recommandé pour tous les adhésifs testés, il n'est pas autant critique d'utiliser une pression sous vide pour contrôler le gauchissement des laminés. En effet, le contrôle de l'épaisseur doit être de l'ordre du nanomètre pour

l'amincissement de tranches de silicium. Si la présence de vide n'est pas contrôlée, les structures de quelques nanomètres déposées sur les tranches de silicium pourraient être entièrement détruites ou tout simplement polies de manière insuffisantes lors de l'étape de polissage physico-chimique (ou CMP du terme anglais « chemical mechanical polishing ») par exemple. Pour le contrôle du gauchissement de laminés, bien qu'il soit important de maintenir le laminé plat tout au long du brasage à la puce électronique, le contrôle se fait plutôt dans l'ordre du micromètre et non dans l'ordre du nanomètre. Par conséquent, cela ne justifie pas l'usage d'un système sous vide pour le collage des échantillons. Ainsi, un collage simple par plaque chauffante, ou dans certains cas dans un four azoté à pression ambiante a été jugé suffisant pour effectuer les collages qui suivent.

Une attention particulière à la planéité des échantillons est nécessaire lors du collage pour favoriser un bon contact. La figure 3.24 montre l'état de l'adhésif une fois que les échantillons de test mécanique ont été séparés. On voit une zone où l'adhésif est plutôt lisse dans le centre où il n'y a pas eu de contact entre les échantillons alors qu'on observe du relief uniquement sur les bordures de l'échantillon où il y a eu contact. Les épaisseurs d'adhésif étant très petites, si la cambrure des échantillons est plus grande que les épaisseurs d'adhésif, il n'y aura pas contact dans les régions où la cambrure est trop grande. La figure 3.25 présente la forme des échantillons utilisés initialement. Les épaisseurs d'adhésif mesurées par *Dektak* sont d'environ 10  $\mu\text{m}$ , il est donc évident que l'adhésif ne fera pas contact sur la totalité de l'étalement d'adhésif. Dans la situation où un laminé est collé sur un support temporaire, le laminé aura tendance à se déformer pour suivre les déformations du support temporaire s'il y en a et permettra donc un meilleur collage. Ce meilleur collage ne peut cependant pas garantir une meilleure planéité si le support n'est pas suffisamment plat. Conséquemment, la précision de l'usinage des pièces de tests mécaniques, mais aussi des supports temporaires qui seront utilisés est nécessaire à la réussite du projet de recherche.

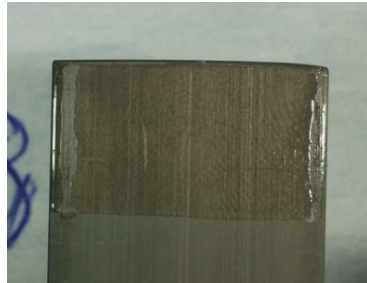


Figure 3.24 Test de collage sur échantillons de pièces de métal.

Les figures 3.26 et 3.27 présentent les mesures de cambrure des supports usinés. Les mesures obtenues permettent de conclure qu'il est possible d'obtenir des cambrures de moins de 20  $\mu\text{m}$  de manière reproductible. Bien que bruitées, les mesures donnent une cambrure

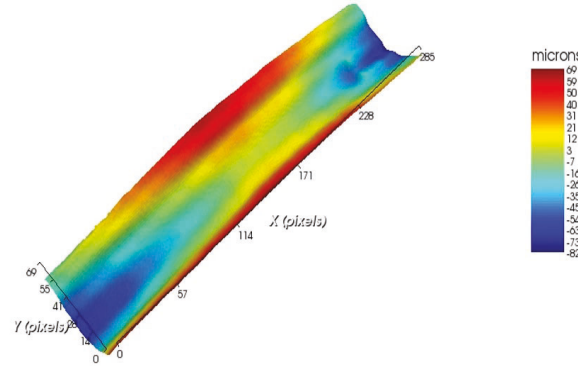


Figure 3.25 Cambrure d'un échantillon utilisé pour faire les tests initiaux de cuisson et collage. Cambrure maximale de 151  $\mu\text{m}$  ici.

de 16,025  $\mu\text{m}$  pour le support non perforé à la figure 3.26 et une cambrure de 19,959  $\mu\text{m}$  pour le support perforé présenté à la figure 3.27. Les deux types de support sont donc considérés utilisables pour les étapes subséquentes du projet, soit le collage au laminé et le processus d'assemblage à la puce électronique. Une mention précisera le type de support utilisé lorsque nécessaire.

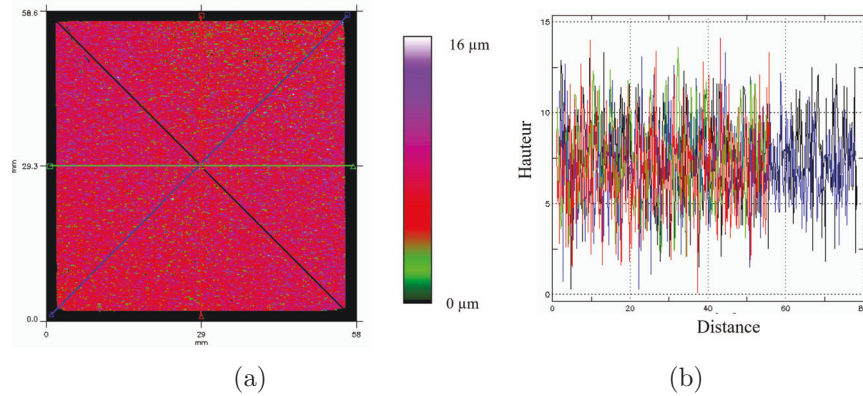


Figure 3.26 Mesure de cambrure d'un support temporaire non perforé.

D'un point de vue de montage relié au collage, il serait possible de procéder au collage en appuyant uniquement sur le site de brasure des laminés, mais bien que le collage serait adéquat dans cette région, le contrôle du gauchissement en périphérie du site de brasure ne serait pas nécessairement assuré. La figure 3.28 montre bien l'impact qu'a le montage de la figure 3.23d par rapport au montage de la figure 3.23c sur le gauchissement en périphérie des laminés où les coins des laminés sont visiblement plus élevés en périphérie lorsque le montage de la figure 3.23c est utilisé. De plus, alors que les hauteurs des *chip bumps* en périphérie du site de brasure sont de plusieurs dizaines de micromètres, soit environ 65  $\mu\text{m}$ , celles du site de brasure se situent généralement entre 10  $\mu$  et 20  $\mu$ . Conséquemment, le



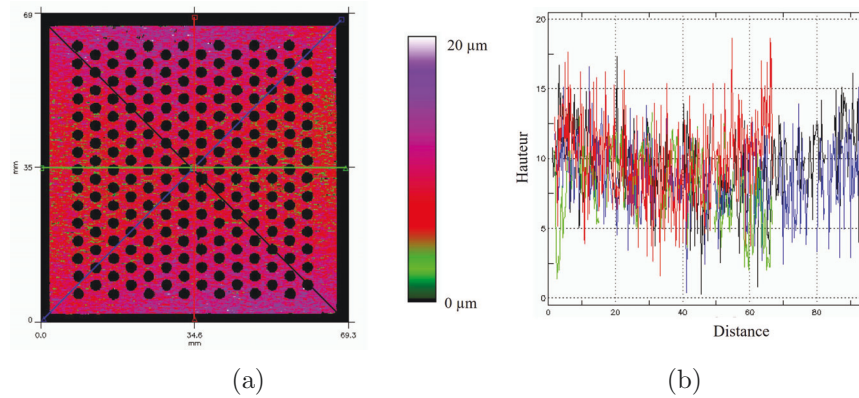
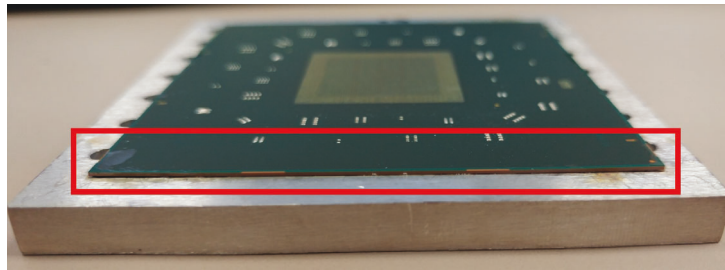


Figure 3.27 Mesure de cambrure d'un support temporaire perforé.

montage utilisé à la figure 3.23b n'assure pas un contrôle du gauchissement adéquat dans la région du site de brasure et favorise donc l'usage du montage de la figure 3.23d.



(a) Collage sans poids périphérique



(b) Collage avec poids périphérique

Figure 3.28 Impact de l'usage des poids périphériques lors du collage de laminés aux supports temporaires.

Lorsqu'on observe les températures de cuisson des différents adhésifs (illustrées dans les prochaines sous-sections), il serait possible de penser que les températures et les pressions utilisées peuvent endommager l'état des *chip bumps* lorsque la température de collage est très proche ou même excède la température de fusion des *chip bumps*. Ceci pourrait facilement induire des déformations permanentes par fluage ou même causer des ponts entre les *chip bumps* avant même que le brasage à la puce électronique soit fait. La figure

3.29 présente une vue rapprochée des *chip bumps* dans la région du site de brasure dont le laminé a subi un collage avec un poids de 500 grammes appliqué uniquement dans la région du site de brasure aux plus hautes températures testées de 230 °C. Il est possible de voir qu'il y a une variation dans la forme des *chip bumps* sans pour autant avoir d'évidences qu'il y ait des ponts. Cette variation peut être due au fait que chaque *chip bump* n'est pas nécessairement à la même hauteur initialement et le collage les rend plus ou moins aplaties. Cet aplatissement de *chip bump* est toutefois très utile et habituellement effectué pour permettre à la puce d'être bien positionnée sur les *chip bumps* avant le brasage. Ce processus d'aplatissement, nommée « *coining* », est une étape supplémentaire lors de la fabrication des laminés, mais pourrait être intégrée à l'étape de collage au support temporaire. Pour valider la possibilité d'intégrer cette étape au collage et mieux quantifier l'aplatissement effectué lors du collage, certains laminés avec un « *coining* » traditionnel ont subi une excursion en température pour arrondir de nouveau les *chip bump* avant le collage. Des mesures de hauteur ont été prises avant et après l'excursion puis après le collage. Le tableau 3.7 présente les hauteurs moyennes dans différentes régions du site de brasure pour deux laminés coreless différents lorsque le HD3007 a été utilisé. Pour les deux échantillons, on observe que les brasures ont bien pris leur formes sphériques suite à la première excursion en température, ce qui est validé par leur augmentation en hauteur. Par la suite, le collage a permis, dans la plupart des cas, de réduire de nouveau la hauteur des brasures comme peut le montrer la figure 3.29 et faire un certain *coining* pour bien supporter la puce avant le brasage.

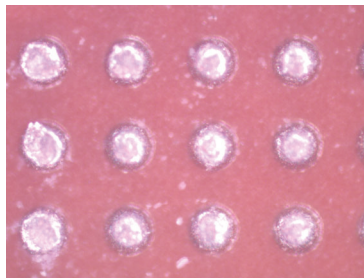


Figure 3.29 Vue de quelques *chip bumps* dans la région du site de brasure d'un laminé ayant été soumis à un collage en fournaise avec HD3007 à 230 °C pendant 20 minutes sous une masse de 500 grammes appliqués uniquement sur le site de brasure.

Tableau 3.7 Étude sur la hauteur des *chip bumps* du site de brasure avant et après excursion en température, puis après le collage au support temporaire. Les mesures ont été faites dans plusieurs régions de la surface totale du site de brasure. I : avant excursion en température, II : après excursion en température, III : après collage au support temporaire.

	Échantillon 1			Échantillon 2		
	I	II	III	I	II	III
1	18,8	16,4	19,3	14,2	18,5	14,9
2	20,3	26,7	19,0	15,6	18,6	17,8
3	18,9	22,1	21,2	13,8	22,2	14,2
4	14,1	22,6	23,2	12,6	20,2	14,8
5	10,6	21,0	26,8	15,1	21,2	13,1
6	11,2	19,8	25,8	14,1	18,1	14,2
7	15,3	19,8	17,4	13,1	24,5	15,9
8	16,4	21,4	14,9	15,8	21,5	13,1
9	16,6	21,4	18,3	13,2	20,3	15,1
10	16,5	22,4	22,7	14,0	22,5	17,7
11	15,9	22,8	22,0	12,5	21,1	21,2
12	14,3	20,6	23,9	10,4	19,7	18,3
13	10,4	25,3	20,2	10,8	17,5	16,9
14	10,2	21,4	17,9	10,1	19,9	15,2
15	9,2	21,5	22,4	8,9	19,5	16,2
16	12,5	17,6	18,8	12,0	18,4	17,3
17	8,5	21,2	19,2	9,9	13,6	19,0
18	10,8	19,4	19,9	11,5	16,8	19,0
19	17,3	25,9	20,9	13,1	20,8	18,7
20	15,3	21,8	23,7	12,2	16,7	18,5
21	16,5	19,7	19,0	12,8	18,5	16,3
22	20,4	25,8	17,7	15,2	20,8	18,9
23	19,6	27,2	20,7	14,5	22,2	14,1
24	18,1	24,6	17,9	14,3	19,2	16,1
25	14,3	21,1	21,8	11,7	17,5	12,8
26	13,1	21,4	24,2	12,2	19,3	12,7
27	15,0	21,0	22,9	11,9	18,4	16,9
Moyenne et écart-type	14,8 - 3,5	21,9 - 2,6	20,8 - 2,8	12,8 - 1,8	19,5 - 2,2	16,2 - 2,2



### 3.5.1 Cuisson et collage du BB305

Le tableau 3.8 présente les cuissons proposées par le fabricant pour une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$  et devraient être faites avant de procéder au collage. Une fois ces cuissons effectuées, une force de 1800 N dans un vide de 5 mbar à une température de 200 °C est recommandée pour procéder au collage d'une tranche de silicium de 200 mm sur son support temporaire. En termes de température et de temps, les propriétés thermiques du support d'aluminium sont jugées suffisamment proches de celles du silicium pour se baser sur les mêmes recommandations. Pour la force, 1800 N sur une tranche de 200 mm correspond à 57,3 kPa. Les masses disponibles pour les tests étaient de 1 kg, soit 3,24 kPa pour ladite surface. Bien que plus cette pression soit beaucoup plus faible que celle recommandée, le contrôle au nanomètre près pour tranche de silicium n'est pas requis ici et 3,24 kPa surpasse grandement les forces de contrôle du gauchissement évaluées à la section 3.1 de quelques centaines de Pascals. Une évaluation mécanique de l'adhésion suit cette section. Finalement, comme mentionné plus tôt, une pression sous vide n'est pas utilisée en raison que l'application ici n'est pas autant critique que lors de l'amincissement des tranches de silicium.

Tableau 3.8 Temps de cuisson de l'adhésif BB305 selon le fabricant.

Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Cuisson 1 (°C, minutes)	Cuisson 2 (°C, minutes)	Cuisson 3 (°C, minutes)
~ 50	60, 3	160, 2	220, 2

Une attention particulière aux températures des plaques chauffantes doit être prise puisque ces appareils peuvent facilement avoir un manque d'uniformité en température à leur surface. De plus, les dispositifs intégrés aux plaques chauffantes indiquent la température généralement qu'en un seul point sur la totalité de la surface. Sans précautions, il est facile d'obtenir des températures trop élevées dans certaines régions de la plaque alors que d'autres régions sont sous la température désirée. Le BB305 est sensé conserver une allure claire à tous points de sa cuisson, mais les manques d'uniformité de température sur la plaque chauffante peuvent résulter en une surcuisson de l'adhésif comme il est possible de le voir sur les échantillons de test à la figure 3.30. En utilisant un intermédiaire entre la plaque chauffante et l'échantillon, tel qu'une tranche de silicium sacrificielle, il est possible de mieux répartir la température sur la surface de la tranche. De plus, en utilisant un appareil tel qu'un thermomètre électronique (thermocouple) manuel, il est possible de mesurer la température en plusieurs points et s'assurer que la surface de la plaque a bel et bien atteint la température désirée et qu'il n'y a pas de régions trop chaudes par rapport à d'autres régions sur la plaque chauffante.

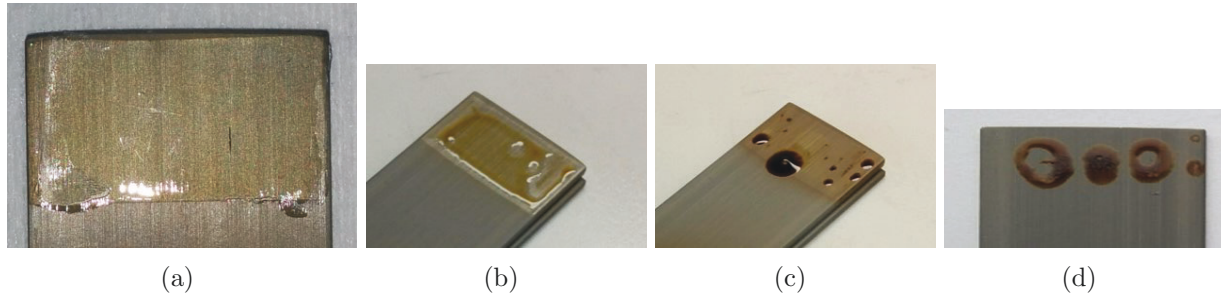


Figure 3.30 (a) Cuisson adéquate de l'adhésif et (b), (c), (d) cuisson inadéquate de l'adhésif à différents stades de sa cuisson.

Comme le verre n'a pas la même conduction thermique que l'aluminium, quelques ajustements sur les temps de cuisson étaient nécessaires. En se servant d'un logiciel tel que *Energy2D* (« *freeware* ») qui permet de faire des interpolations sur la conduction de la chaleur basées sur les lois de Fourier, on peut conclure qu'ajouter une minute à chaque étape de cuisson aide à corriger les temps de référence du tableau 3.8 lorsqu'un substrat de verre de 3,2 mm (1/8 de pouce) est utilisé comme support.

Les premiers tests étant faits avec le montage de la figure 3.23b appliquant une pression non-uniforme, la qualité du collage était imparfaite comme peut le montrer la figure 3.31 qui présente différentes photos prises du BSM pris à travers le verre une fois collé. Après les avancements dans les techniques de collage et la disponibilité des support temporaires en aluminium, les montages pour collage de laminé ont été ajustés pour appuyer directement sur le site de brasure (schémas des figures 3.23c et 3.23d). Comme il n'est pas possible de voir l'état du collage comme on peut le voir à travers le verre lorsqu'on utilise une plaque d'aluminium, des résultats plus détaillés de qualité de collage sont présentés dans les sections 3.7 et 4.3.

Une deuxième approche de cuisson du BB305 a aussi été étudiée, soit une cuisson par four. Ceci pourrait simplifier les cuissons avant collage et assurer une meilleure uniformité en température. La figure 3.32 schématise les deux différentes approches. Tandis que l'approche par four requiert un retour à température pièce avant collage, les thermoplastiques ont la propriété de pouvoir être chauffés à plusieurs reprises sans détérioration, comme présenté à la section 2.4.3. Pour compenser le retour à température pièce, un collage à 230 °C a été choisi. Ceci limite la déformation des *chip bumps* et augmente les chances d'un bon mouillage entre le support et le laminé. Comme montré précédemment, les *chip bumps* parviennent à résister adéquatement à une telle température pendant 10 minutes.

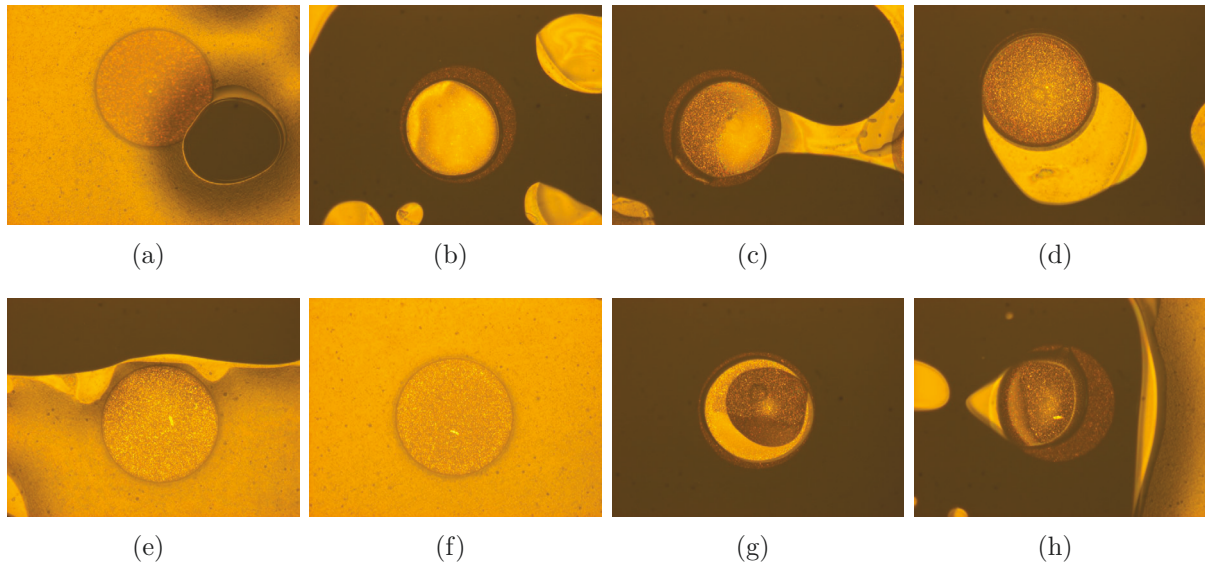


Figure 3.31 Photos prises à travers le verre sur le BSM d'un laminé collé sur une plaque de verre. Les régions sans bulles telles que la figure f correspondent à un collage satisfaisant alors que les régions avec bulles correspondent à un collage partiel.

Pour confirmer l'efficacité de la cuisson par four, des tests d'analyse sur le degré de cuisson des adhésifs ont été effectués. Un des appareils utilisé pour cette mesure est un calorimètre différentiel à balayage, soit un *CDB* (ou *differential scanning calorimetry*, ou DSC en anglais). Cet appareil permet d'étudier les échanges de chaleur entre un échantillon cuit préalablement et une référence du même adhésif préparé en avance par le même appareil. Si la réponse de l'échantillon déjà cuit n'est pas affectée par le balayage en température, la polymérisation est complète. La figure 3.33 présente les tests de CDB sur le BB305 et révèlent ici une polymérisation complète du BB305. L'échantillon déjà cuit n'absorbe ou n'émet pas d'énergie synonyme de polymérisation et valide l'utilisation du four pour sa cuisson.

Par la suite, des tests de collage ont aussi été faits à l'aide d'un four. La figure 3.34 présente le montage de collage préparé dans un four. Il faut bien sûr s'assurer que la pression est appliquée adéquatement sur l'échantillon pour obtenir un bon collage. Ces tests ont donné des résultats de collage aussi concluants que lorsqu'effectués par plaque chauffante. La cuisson et le collage par four a donc été retenu pour l'évaluation mécanique du BB305 ainsi que pour le collage sur support temporaire.

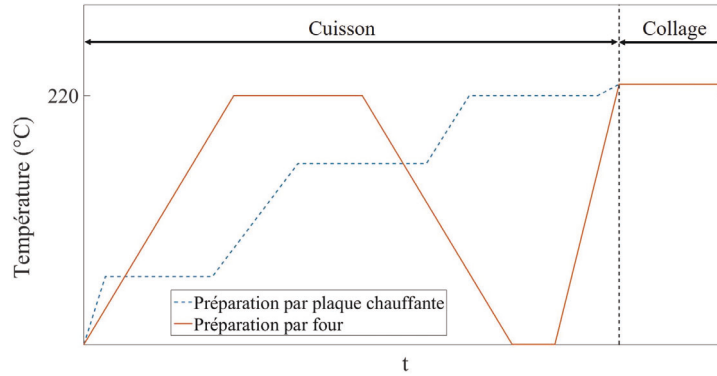


Figure 3.32 Schématisation de la procédure de cuisson par plaque chauffante et par four du BB305.

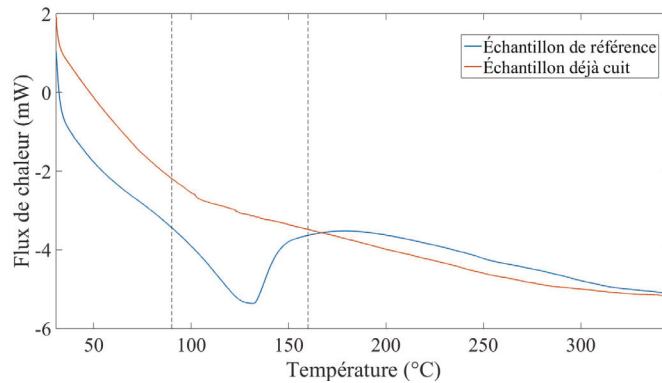


Figure 3.33 Réponse en flux de chaleur lors des tests de CDB du BB305 avec échantillon préparé dans un four.

### 3.5.2 Cuisson et collage du HD3007

Contrairement au BB305, le HD3007 est un adhésif thermodurcissable. Lors de sa cuisson, les solvants présents s'évaporent et les polymères, sous l'effet de la température, créent un maillage serré de monomères comme présenté à la section 2.4.3.

Le HD3007 possède un processus de cuisson différent de celui du BB305. Si l'adhésif est employé pour son usage régulier, deux techniques sont proposées par le fabricant.

Pour une tranche de silicium entière, une série de cuissons sont proposées comme le présente le tableau 3.9. Ces cuissons ont été respectées pour les essais préliminaires du projet. Une fois l'échantillon sous 150 °C après la cuisson, il est recommandé de refroidir l'échantillon sous 40 °C avant de l'extraire du four et procéder à l'étape suivante, soit la remontée en température une fois le montage pour le collage préparé.

Pour le collage d'une tranche de silicium complète, une atmosphère inerte est recommandée et les températures et pressions de collage proposées sont d'environ 350 °C et plus de 10 psi



Figure 3.34 Montage utilisé lors du collage d'un laminé à une pièce d'aluminium. Un poids central et un poids périphérique déposés sur le laminé qui repose sur la plaque d'aluminium sont visibles. Bien que caché dans l'ombre, il est possible d'entrevoir le laminé entre le poids central et le poids périphérique.

Tableau 3.9 Procédure de cuisson du HD3007 préalable au collage d'une tranche de silicium entière. (\*) il est nécessaire de revenir à température ambiante pour procéder au montage servant au collage.

Étape de cuisson	Rampe de monté en température (°C/min)	Température du plateau (°C)	Durée du plateau (minutes)	Environnement
1	n/a	90	1,5	Plaque chauffante
2	n/a	120	1,5	Plaque chauffante
3	5	200	30	Four
4	5	300	60	Four
5	entre 0 et -10 *	< 150	0	Four

(~69 kPa) pendant 10 minutes pour un film de ~4  $\mu\text{m}$ . Cependant, des résultats de collage entre 200 °C et 300 °C sont présentés dans [65] et parviennent dans tous les cas à des collages fonctionnels, bien que quelques défauts soient observés à l'interface de collage. Basé sur ces résultats encourageants, un premier test a été effectué sur les échantillons en aluminium usinés en utilisant un collage à 200 °C. La pression était de 6.9 MPa, soit la pression minimale applicable à l'aide la presse industrielle disponible. L'atmosphère inerte n'a pas pu être maintenue pour l'étape de collage puisque les plaques de la presse industrielle n'étaient pas scellées, mais la polymérisation s'étant faite en atmosphère inerte a limité les possibilités d'impureté dans la couche d'adhésif déposée.

Les pièces collées à l'aide de cette technique ont été décollées afin d'étudier la qualité de collage. La figure 3.35 présente l'allure des pièces une fois décollées. Il est possible d'observer que presque tout l'adhésif se retrouve sur une des deux pièces collées. Ceci laisse croire que le collage entre les deux pièces était très faible. Conséquemment, la seconde technique de collage a été étudiée pour tenter d'améliorer la procédure de collage.



Figure 3.35 Échantillons de test de collage suivant la technique de collage de tranche de silicium. La section jaunie de la pièce de droite est la zone où l'adhésif a été déposé. La seconde pièce est celle utilisée pour le collage selon la figure 3.23a

La seconde technique proposée, davantage orientée pour le collage de puce électronique unique, ne comprend pas de cuisson avant de procéder au collage. Une fois l'étalement effectué, il suffit d'effectuer le collage entre les pièces puis faire immédiatement la montée en température de l'assemblage. Bien que non discuté par le fabricant, vu la petite taille d'une puce électronique par rapport à la taille d'une tranche de silicium entière, il est possible que l'évacuation des solvants et la polymérisation de l'adhésif se fassent plus facilement et ne nécessitent conséquemment pas de cuisson avant le collage. Selon les recommandations, une température d'au moins 275 °C avec une pression de 1.4 MPa pendant 3 secondes sont proposées. Encore une fois, selon [65], un collage immédiat suite à l'étalement à 200 °C pendant 15 minutes a été effectué, soit un collage plus long dans l'espoir de compenser pour la température plus basse. La presse industrielle à plaque chauffante a aussi été utilisée pour ce collage en fournissant l'équivalent de 454 kg de masse (valeur minimale) en utilisant le montage de la figure 3.23a. Ici, même si l'adhésif n'est pas en environnement inerte, il baigne dans ses solvants et peut ainsi limiter l'accès de l'air à la couche d'adhésif. Ceci permet peut-être même un meilleur collage si l'évacuation des solvants se fait convenablement. La figure 3.36 présente les pièces préparées selon cette

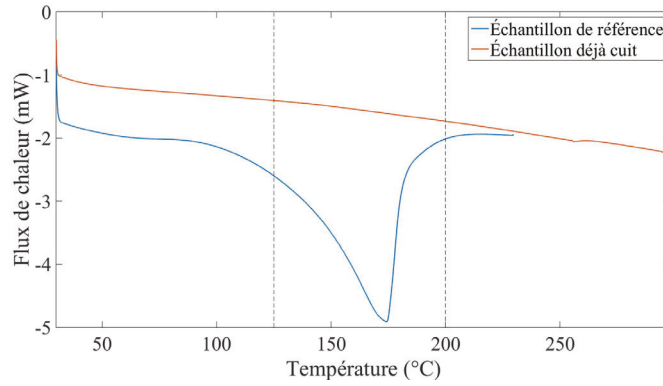


méthode une fois séparées. Il est possible de voir beaucoup plus de résidus présents sur les deux pièces utilisées. Cette technique semble favoriser un mouillage supérieur par rapport à la première technique de collage et permet donc un meilleur collage entre les pièces. Des tests subséquents en four pour la seconde technique de collage ont présenté des résultats aussi concluants en utilisant des masses de 500 grammes. Comme le four facilite le montage à effectuer par rapport à la presse industrielle, le four avec une masse de 500 grammes a été favorisé pour les tests qui ont suivi dans le projet, et ce, en utilisant la technique de collage pour puce électronique unique.

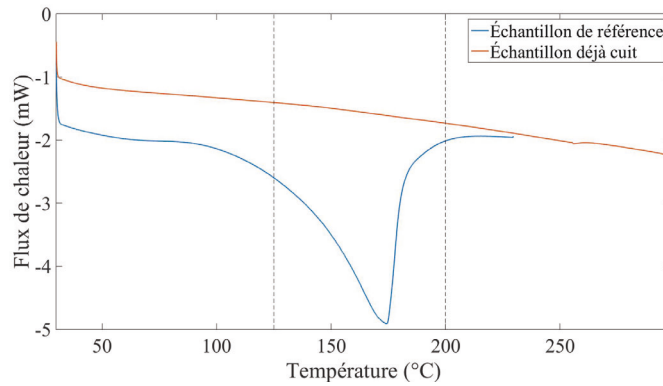


Figure 3.36 Échantillons de test de collage suivant la technique de collage de puce électronique unique. Le montage a été fait selon la figure 3.23a

Bien que le collage ait été fonctionnel à 200 °C, selon [65], des résultats améliorés sont aussi présentés lorsque la température de collage s'approche de 250 °C. Ainsi, sachant que les *chip bumps* peuvent résister à un collage à 230 °C en appuyant uniquement sur le site de brasure avec une masse de 500 grammes, ce sont ces paramètres de cuisson qui ont été retenus. Ainsi, pour le collage du HD3007, les expériences des prochaines sections ont utilisé les paramètres de collage de 230 °C avec une masse de 500 grammes pour les différents montages présentés à la figure 3.23. En outre, malgré que le fabricant recommande des cuissons plus élevées, il a été possible d'observer des degrés de polymérisation pratiquement complets sur le HD3007 autant à 230 °C qu'à 250 °C à l'aide du CDB. La figure 3.37 présente les deux profils de température utilisés lors des tests de CDB. Considérant la nature thermodurcissable du HD3007 et la théorie sur les adhésifs présentés à la section 2.4.3, il est possible que l'état de l'adhésif soit polymérisé de manière adéquate à ces températures, mais la finesse du maillage peut possiblement être différente selon les différentes températures de cuisson. La section suivante développe un peu plus sur ce sujet.



(a) Profil de cuisson jusqu'à 230 °C



(b) Profil de cuisson jusqu'à 250 °C

Figure 3.37 Réponse en flux de chaleur lors des tests de CDB.

### 3.6 Évaluation mécanique des adhésifs

Inspiré des normes ASTM (« *American society for testing materials* »), soit une organisation définissant des standards de tests pour matériaux, un test en tension a été sélectionné afin d'évaluer si l'adhésif est suffisamment fort pour maintenir les laminés plats en se basant sur les courbes obtenues au TherMoiré de la section 3.1. Le design initial basé sur les normes ASTM [78, 79] présenté à la figure 3.38 serait le style de pièce nécessaire pour effectuer l'évaluation de la force en tension. Des tests en cisaillement ont aussi été considérés, mais les techniques de décollage retenues n'obligeaient pas de tester les adhésifs en cisaillement.

Plusieurs limitations empêchaient l'utilisation de l'échantillon ci-dessus. Premièrement, l'appareil Instron utilisé n'était pas adapté pour manipuler ce genre d'échantillons. Il était possible de coller des pièces à l'aide d'une colle époxy sur ces échantillons pour ultimement rendre l'échantillon compatible à l'Instron. Bien que cette configuration permette de tester les adhésifs puisque la colle époxy était plus forte que les adhésifs testés, cette situation



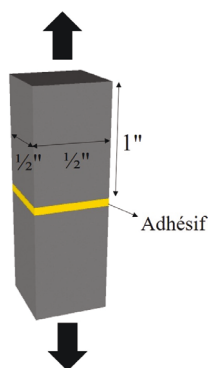


Figure 3.38 Échantillons recommandés par ASTM pour tests mécaniques en tension.

est valide uniquement à température ambiante puisque la colle époxy ne résiste pas à des température élevées. Comme le but des adhésifs est de contrôler le gauchissement à température élevée, il faut aussi évaluer l'efficacité mécanique des adhésifs à température élevée.

Pour permettre d'avoir des échantillons compatibles à température ambiante et à température élevée, une configuration telle que présentée à la figure 3.39 où seules des pièces compatibles avec l'appareil Instron ont été utilisées. Le matériau de choix a été l'aluminium pour tenter d'être le plus comparable à la situation réelle où un support d'aluminium est utilisé pour coller le laminé.



Figure 3.39 Échantillon pour configuration de tests mécaniques en tension et en cisaillement compatibles à température ambiante et à température élevées.

On retrouve aux figures 3.40 et 3.42 les comportements en tension des adhésifs retenus. Comme premières observations, ces tests révèlent que les contraintes maximales de ces adhésifs sont bien au-delà des forces de contrôle du gauchissement observées à la section 3.1, et ce, même pour des températures élevées.

On peut bien observer à la figure 3.40 le comportement thermoplastique de l'adhésif BB305 qui devient beaucoup plus souple lorsque testé à 250 °C et ne parvient pas à maintenir les pièces collées ensemble aussi bien qu'à température ambiante. Toutefois, les forces de contrôle du gauchissement des laminés coreless observées se trouvaient davantage dans l'ordre des pascals que les kilopascals. Le BB305 devrait donc être en mesure de contrôler le gauchissement des laminés coreless. La courbe de tension à température ambiante présente des comportements particuliers qui peut s'apparenter à certains matériaux élastiques où la rigidité du polymère augmente avec la contrainte appliquée [80]. Une des autres explications de ce comportement peut être due au fait que le contact entre les deux surfaces n'était pas parfait. Ceci a induit d'autres types de contraintes que de la tension, tel que du cisaillement, et a pu faire varier la rigidité du polymère. La figure 3.41 présente l'état de la surface des échantillons de test suite au test en tension. On observe deux zones où le contact a été adéquat. Un ajustement dans le calcul de la contrainte en pascals a été fait. Les échantillons de BB305 à température élevée ont eu d'excellentes surfaces de contact comparativement à cet échantillon.

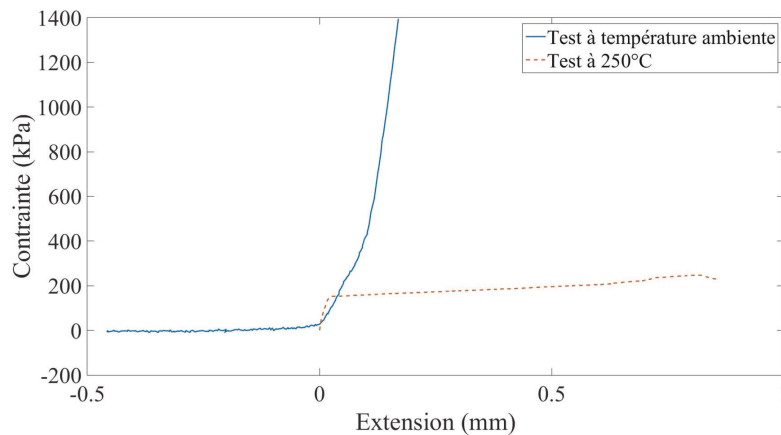


Figure 3.40 Adhésif BB305 soumis à un test mécanique de tension à température ambiante et à température élevée.

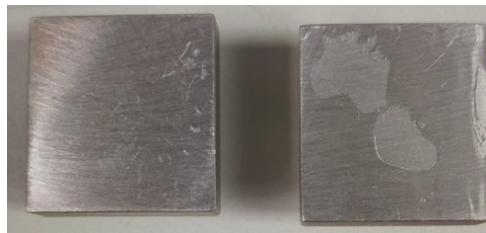


Figure 3.41 Pièces de test en tension de l'adhésif BB305 suite au test de tension.

Quant à l'adhésif HD3007, comme attendu par sa nature therm durcissable, il ne devient pas moins rigide à température élevée. De plus, on observe même une augmentation de

la rigidité de l'adhésif HD3007 lorsque testé à 250 °C. Comme présenté à la section 3.5, la cuisson de l'adhésif HD3007 a été faite à 230 °C et un test en tension à plus haute température peut ultimement avoir effectué un plus haut degré de maillage dans l'adhésif même si les tests de polymérisation indiquaient une polymérisation complète. Cette déduction peut aussi être faite de [81] qui évalue par transmission infrarouge la présence de groupements chimique correspondant au polyimide. Bien que les tests de cet article aient été faits entre 300 °C et 400 °C, il est nettement possible de voir une différence en dureté et peut laisser penser qu'une différence peut être observée entre les deux températures observées ici. Toutefois, des travaux futurs dans les présentes conditions seraient pertinentes. Lors du test en tension à température élevée, il a été possible de voir la présence de filaments qui reliaient les 2 pièces sous tension mécanique au fur et à mesure que les pièces se séparaient. Ceci s'exprime par la longue elongation lors de ce test mécanique.

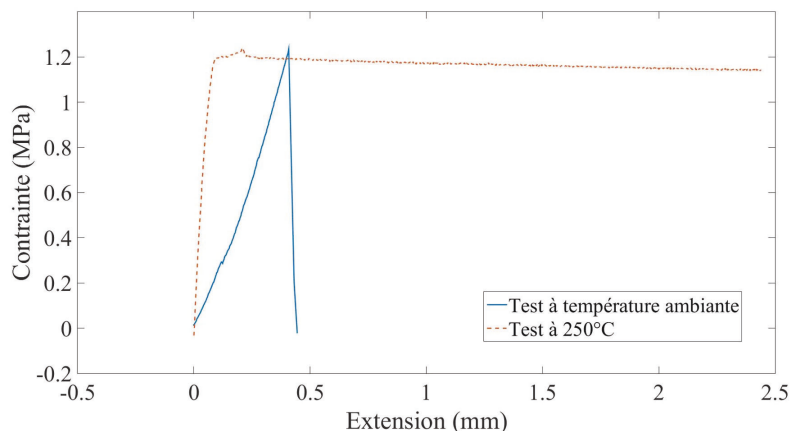


Figure 3.42 Adhésif HD3007 soumis à un test mécanique de tension à température ambiante et à température élevée.

Comme il est difficile d'identifier la limite de déformation élastique et la limite de déformation plastique sur les graphiques de contrainte versus elongation, et puisque les adhésifs ont eu des ruptures fragiles ou des comportements non conventionnels, le tableau 3.10 présente plutôt la contrainte maximale observée des adhésifs. On observe une valeur beaucoup plus faible pour l'adhésif BB305 à température élevée, mais se trouve tout de même à être près de 1000 fois plus fort que la pression utilisée pour atteindre les gauchissements les plus faibles des laminés coreless observés à la section 3.1.

### 3.7 Processus de décollage des adhésifs

Le décollage des laminés collés à leur support temporaire est aussi une partie critique du processus d'assemblage. Bien que maintenir les laminés plats lors du brasage à la puce électronique est le but principal du projet de recherche, le procédé de décollage des laminés

Tableau 3.10 Force maximale des adhésifs à température ambiante et à température élevée.

Température de test (°C)	BB305 (MPa)	HD3007 (MPa)
25	1,39	1,24
250	0,25	1,24

ne doit pas compromettre l'état du laminé. Cet oubli oblige nécessairement de retravailler la solution afin de garantir l'état intact du laminé à la fin du procédé d'assemblage. Une des étapes importantes suivant le décollage de l'assemblage est la pose des billes sur le BSM (« ball attach »). L'état du BSM avant l'attache des billes est bien sûr critique à la réussite de ce procédé. Les sections qui suivent présentent les procédures de décollage employées pour les différents adhésifs.

### 3.7.1 Décollage du BB305

Une des particularités du BB305 est que le décollage peut se faire facilement à température ambiante. Selon le fabricant, il est possible de procéder à un décollage en soulevant un des côtés de la pièce à décoller sans nécessiter de solvant en premier lieu pour retirer le plus d'adhésif possible. Une lame telle que schématisée à la figure 3.43 suffit à effectuer le décollage. Les traces restantes de l'adhésif sur le laminé peuvent être nettoyées par son solvant, le ZoneBond Remover, assez facilement et rapidement.



Figure 3.43 Schéma de décollage d'un laminé à l'aide d'une lame insérée entre le support temporaire et le laminé.

Comme mentionné dans la section 3.4, des étalements directement sur le laminé et des étalements sur le support temporaire ont été effectués avant de procéder au collage. Dans les deux situations, il n'y a pas eu de problèmes à faire le décollage à l'aide d'une lame comme le présente la figure 3.44 où les deux types de support temporaires utilisés sont aussi présentés. Dépendamment d'où l'étalement a été fait, soit sur le laminé ou sur le support temporaire, il est possible d'observer que les résidus d'adhésif, une fois le décollage fait, ne se retrouvent pas au même endroit. Si l'étalement a été fait sur le support, la majeure partie des résidus de l'adhésif se retrouvent sur le support temporaire, alors que si l'étalement se fait sur le laminé, les résidus d'adhésif sont sur le laminé. Dans les deux cas, l'adhésion du BB305 est similaire. Un nettoyage de quelques minutes, soit 5 minutes, à 50-60 °C suffit

à retirer les traces restantes d'adhésif BB305 sur les surfaces et ne semble pas abîmer les surfaces des laminés.

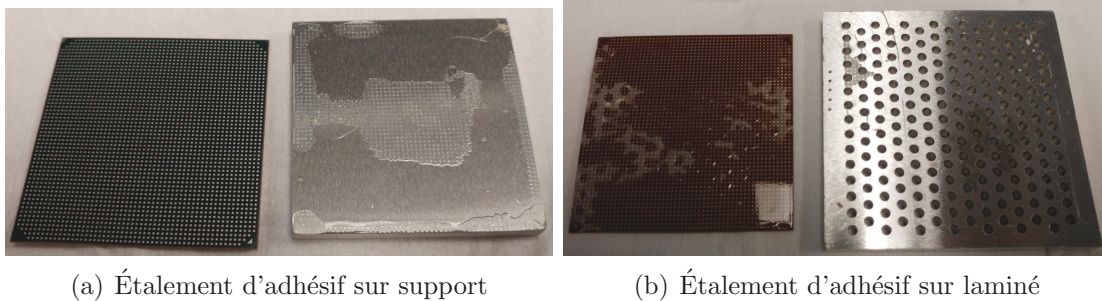


Figure 3.44 Échantillons décollés par lame de leur support temporaire. Deux différents types de laminé ont été utilisés et explique la couleur différente des BSM visibles en a) et en b).

### 3.7.2 Décollage du HD3007

L'adhésif HD3007 est un adhésif beaucoup plus rigide que l'adhésif BB305 si l'on observe les résultats de tests mécaniques en tension (section 3.6). S'il tient plus solidement, il est nécessairement plus difficile à décoller et dissoudre. Il n'est pas possible comme l'adhésif BB305 de faire un décollage mécanique et un décollage par laser n'est pas une option avec un support en aluminium. Il est donc nécessaire d'utiliser un solvant. Les adhésifs à base de polyimides peuvent être dissout à l'aide de N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP) qui est retrouvé dans le *EKC830* et le *EKC865*. Par contre, par recherches internes chez IBM, les laminés sont aussi endommagés par les solvants à base de NMP en raison d'une dissolution partielle. Cependant, comme le degré de polymérisation de l'adhésif utilisé pour coller le laminé sur le support temporaire n'est pas total selon les recommandations de cuisson présentées à la section 3.5, il est possible de penser que la dissolution sera suffisamment courte pour ne pas abîmer les laminés de manière critique. De plus, le temps de dissolution est grandement réduit si la température du solvant est plus haute que la température ambiante. Les tests ici sont faits à des températures d'environ 85 °C. La figure 3.45 présente le montage utilisé dans une hotte ventilée pour faire la dissolution de l'adhésif HD3007.

La dissolution de l'adhésif dépend grandement du degré d'exposition au solvant. L'absence de perforation dans un support temporaire résulte en un accès du solvant et une évacuation des résidus limités à la périphérie du support temporaire. En effet, après plus de 6 heures, de trempage dans le solvant, seuls les coins du laminé étaient décollés et l'état du laminé le rendait inutilisable comme présenté à la figure 3.46.

L'usage d'un support perforé a permis de réduire considérablement le temps de dissolution, soit 90 minutes de trempage. La figure 3.47 présente l'état du laminé suite à ce processus.

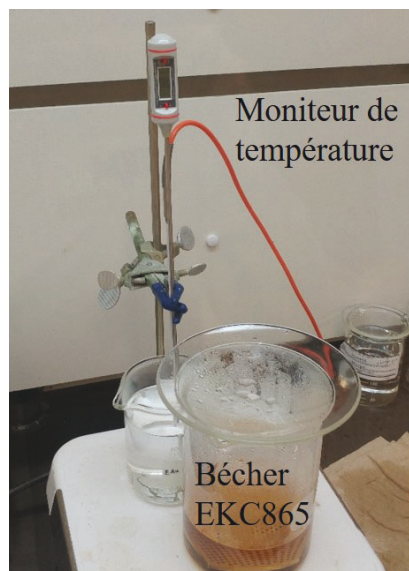


Figure 3.45 Montage utilisé pour la dissolution du HD3007.

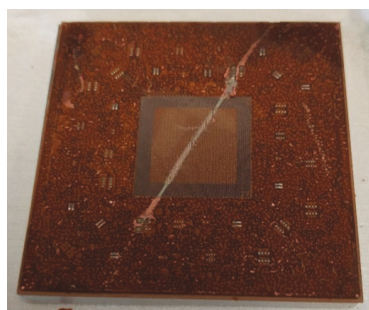


Figure 3.46 Laminé sur support temporaire sans perforation trempé dans le EKC865 en température pendant plus de 6 heures. Une marque traversant le laminé a été faite en tentant de décoller le laminé en appliquant une force de cisaillement sans succès.

Bien que son état soit amélioré par rapport à la figure 3.46 et qu'il ait été possible de procéder au décollage, il est toujours considéré inutilisable vu ses régions grandement abîmées, ou manquantes.

L'accès du solvant à l'interface entre le laminé et le support temporaire est l'étape la plus difficile. Les coins peuvent par contre être soulevés après environ 5 minutes de trempage. Il est donc possible d'aider le processus de décollage en insérant de petits leviers pouvant donner un meilleur accès à l'interface pour le solvant. La figure 3.48 présente un procédé de trempage se servant de pièces de silicium comme levier. Le temps de trempage nécessaire pour procéder au décollage a été considérablement réduit en passant à 35 minutes. L'état du laminé ne semble pas être endommagé. Par contre, bien que l'idée soit intéressante, le processus de décollage se complexifie en nécessitant quelques étapes intermédiaires sup-



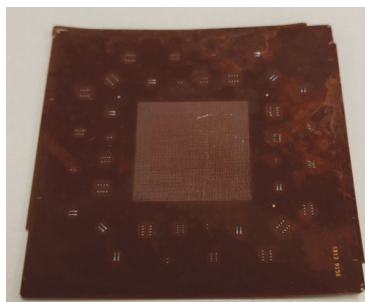


Figure 3.47 État d'un laminé trempé dans le EKC865 en température pendant 90 minutes collé sur un support temporaire perforé.

plémentaires qui engendreraient des coûts et des temps supplémentaires d'assemblage. De plus, il reste ultimement toujours des traces de l'adhésif sur le BSM du laminé tel que présenté à la figure 3.49.

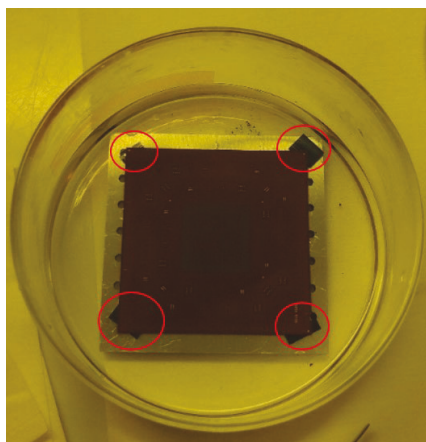


Figure 3.48 Montage utilisé pour procéder au décollage en utilisant des pièces de silicium comme levier aux coins du laminé.

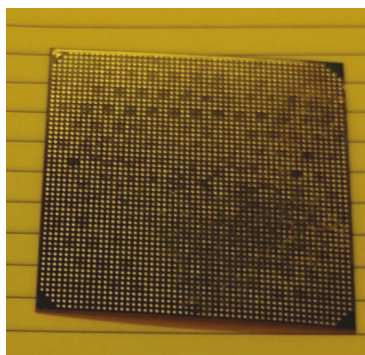


Figure 3.49 BSM du laminé décollé selon le montage avec leviers aux coins du laminé (figure 3.48).

Une alternative au soulèvement des coins a donc été poursuivie où les trempages étaient faits par intervalles de 10 minutes avec rinçage entre chaque immersion. Le temps d'immersion

total a été rallongé à environ 90 minutes, mais , comme présenté à la figure 3.50, l'état du laminé semble être sans dommages et sans résidus apparents. Une hypothèse est qu'il faille percer une couche de passivation à chaque nouveau trempage dans le solvant. Cette approche a été employée pour la suite du projet vu ses résultats encourageants et sa simplicité par rapport à l'approche par leviers.

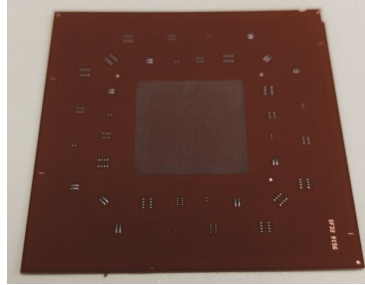


Figure 3.50 Laminé décollé en effectuant multiples trempages de 10 minutes avec rinçage entre chaque trempage.



# CHAPITRE 4

## Évaluation du contrôle du gauchissement

Maintenant que les principes de base ont été étudiés, développés et optimisés, il est possible d'envisager la solution d'adhésifs et supports temporaires pour contrôler le gauchissement des laminés lors de l'assemblage à la puce électronique. Chaque étape additionnelle a été individuellement testée afin de vérifier la fonctionnalité de chacune d'entre elles et semble se combiner adéquatement pour former un assemblage complet et efficace. Les sections qui suivent maintenant s'interrogent beaucoup plus précisément sur le contrôle du gauchissement à l'aide des adhésifs temporaires. Une première section présentera des simulations de contrôle du gauchissement pour tenter d'appuyer les expériences de contrôle du gauchissement qui seront faites dans la seconde section, puis des tests sur assemblage complet seront ensuite présentés à la dernière section.

### 4.1 Simulations du gauchissement à l'aide d'éléments finis

Le gauchissement peut être quelque chose de difficile à prédire puisque plusieurs facteurs sont à considérer. Il ne suffit généralement pas de considérer le pourcentage de cuivre présent dans une couche d'un laminé pour prédire de manière précise le gauchissement d'un assemblage de puce électronique renversée. Les tendances observées dans les simulations peuvent être très révélatrices du comportement habituel d'un assemblage même si les valeurs simulées ne sont pas les mêmes que celles réelles. Conséquemment, une plateforme de simulation d'assemblage de puce électronique renversée disponible à l'Université de Sherbrooke, dénommé « *Frisky* » [82, 83], a été choisi et adapté pour étudier les effets d'un support temporaire sur le gauchissement des assemblages, ainsi que des laminés sans puce électronique ni underfill.

Comme point de référence, il peut être pertinent de présenter le gauchissement d'un assemblage à puce renversée fait de manière standard. De plus, ces mesures servent à comparer le gauchissement après underfill d'un assemblage standard au gauchissement d'un assemblage avec support, comme il sera présenté plus loin dans cette section. La figure 4.1 présente le gauchissement simulé d'un assemblage standard basé sur les dimensions et propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans le présent projet de recherche. Une rapide description est présentée au tableau 4.1 et une liste complète est fournie en annexe. Seul un quart

de l'assemblage est simulé vu les symétries dans ce genre d'assemblage et la possibilité de réduire le temps de calcul. Bien que la simulation présente le gauchissement total de l'assemblage comme étant  $633,8 \mu\text{m}$ , il est intéressant d'observer le gauchissement dans la région du site de brasure aussi, soit  $145,2 \mu\text{m}$  et  $488,6 \mu\text{m}$  à l'extérieur de la région du site de brasure. En étudiant les CET des différents éléments, on observe un gauchissement positif, ce qui est différent du comportement des laminés utilisés dans le présent projet lorsqu'ils ne sont pas soudés à la puce électronique (discuté aux sections 3.1 et 4.2). La force générée par les différents CET en jeu force le laminé à se cambrer de manière positive à température ambiante. En effet, lors de la simulation, à température élevée ( $150^\circ\text{C}$  est une valeur acceptée en simulation), les pièces sont assemblées et considérées planes. Une fois assemblées et de retour à température ambiante, le laminé se contracte beaucoup plus que la puce électronique et induit donc une déformation dans le but compenser la contrainte causée par le brasage à la puce électronique.

Tableau 4.1 Paramètres de base à ajuster dans l'environnement Frisky.

Paramètre	Grandeur
Laminé	Devil $55 \text{ mm} * 55 \text{ mm}$
Dimensions de la puce électronique	$20,5 \text{ mm} * 20,5 \text{ mm}$
Épaisseur de l'underfill	$0,06 \mu\text{m}$ (voir section 4.3)

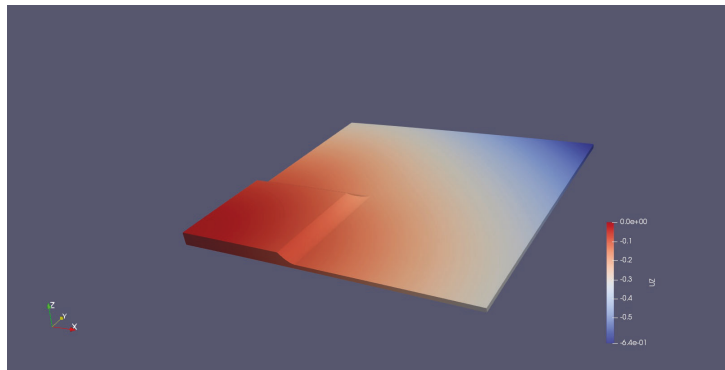


Figure 4.1 Gauchissement simulé d'un assemblage standard présenté en quart d'assemblage. La température d'équilibre a été posée à  $150^\circ\text{C}$  et la simulation a été mesurée à  $25^\circ\text{C}$  et l'échelle « UZ » est en millimètres de  $-0,64 \text{ mm}$  à  $0 \text{ mm}$ .

Comme observé à la figure 4.1, l'assemblage simulé inclu une puce électronique. Le gauchissement simulé considère donc la différence des propriétés mécaniques du laminé, de l'underfill et de la puce électronique. Pour le projet de contrôle du gauchissement, la simulation du gauchissement au moment qui précède le brasage à la puce électronique peut être très utile afin d'évaluer de manière quantitative l'ajout d'un support temporaire lors du moment critique du brasage de la puce au laminé. Or, Frisky ne permet pas de simuler le

gauchissement d'un laminé seul. Il est toutefois possible d'imaginer un assemblage ayant des propriétés mécaniques de puce électronique et d'underfill si faibles qu'elles n'interfèrent pas de manière critique sur le gauchissement du laminé. La figure 4.2 présente une telle simulation pour représenter le gauchissement d'un laminé. À température ambiante, la région du site de brasure a un gauchissement de  $-25 \mu\text{m}$ , alors que l'extérieur de la région extérieure a un gauchissement de  $-456,7 \mu\text{m}$ . Il est aisé de voir que l'ajout d'une puce électronique influence grandement le gauchissement de l'assemblage en modifiant le gauchissement du site de brasure par plus de 430 %. C'est dans cette région que le stress est le plus important puisque le gauchissement de la région extérieure au site de brasure n'est affecté que d'environ 150 %.

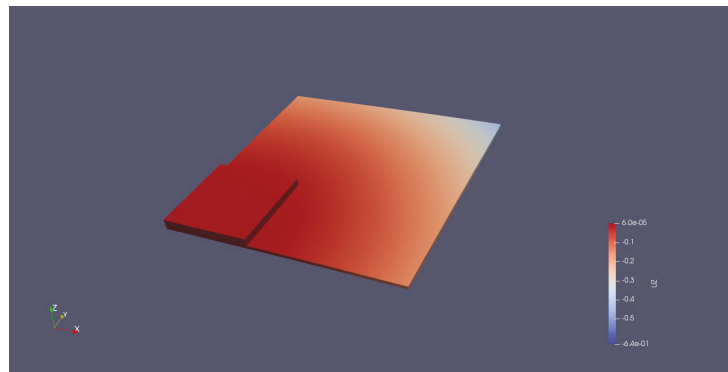


Figure 4.2 Simulation Frisky où les propriétés mécaniques de la puce électronique et de l'underfill sont altérées pour minimiser leur impact sur le gauchissement total du laminé. La température d'équilibre a été posée à  $230^\circ\text{C}$ , basé sur la température de collage au support temporaire, et la simulation a été mesurée à  $25^\circ\text{C}$ . L'échelle « UZ » va de  $-0,64 \text{ mm}$  à  $6 * 10^{-5} \text{ mm}$

L'ajout d'un support temporaire est considéré dans Frisky comme étant l'ajout d'un PCB aux propriétés non conventionnelles, soit en y programmant les propriétés de l'aluminium qui a été identifié précédemment comme le matériau du support temporaire. Dans l'environnement Frisky, le BGA, qui relie le PCB au laminé, peut aussi être ajusté afin de représenter les propriétés de l'adhésif utilisé, mais les simulations ont révélé que le gauchissement est peu affecté par le changement des propriétés des adhésifs pour l'épaisseur donnée de  $1 \mu\text{m}$ . Les changements de gauchissement en modifiant les propriétés des adhésifs sont moins de 1 %. Le tableau 4.2 présente les propriétés du support temporaire qui seront le PCB dans l'environnement Frisky.

La figure 4.3 présentent les gauchissements à différentes températures du site de brasure et de la région extérieure au site de brasure respectivement pour un laminé sans support temporaire et aussi pour un laminé collé à différentes épaisseurs de supports temporaires en aluminium. Contrairement à ce qui peut être anticipé, l'ajout d'une plaque d'alumi-

Tableau 4.2 Propriétés du support temporaire utilisé dans la simulation Frisky.

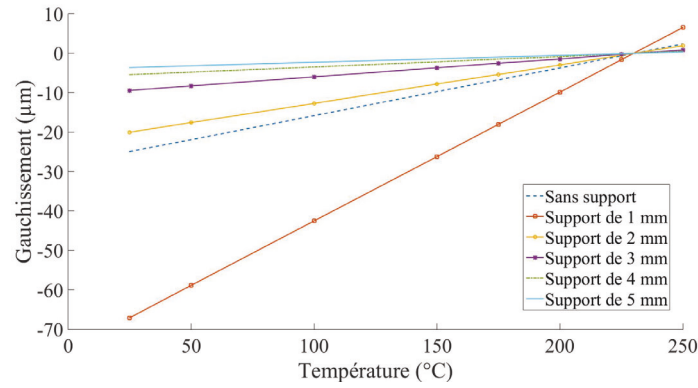
Paramètre	Support d'aluminium
Module d'Young (MPa)	68900 (23580 si perforé)
Ratio de Poisson	0,3
CET (ppm/K)	23,6
Dimensions xy (mm <sup>2</sup> )	65 * 65
Épaisseur	1 mm à 5 mm

nium de 1 mm d'épaisseur n'améliore pas le gauchissement d'un laminé. La différence de CET, même si faible, entre le laminé (20 ppm/K) et l'aluminium (23,6 ppm/K) se fait grandement ressentir. Des simulations où le CET du support temporaire est ajusté à 20 ppm/K viennent grandement réduire le gauchissement pour un support temporaire de 1 mm, soit 27,1  $\mu\text{m}$  et 196,5  $\mu\text{m}$  à température ambiante à titre de comparatif. La rigidité de l'aluminium ne parvient pas à contrer les forces générées par la différence de CET dans ce cas et engendrerait une plus grande variation de gauchissement du site de brasure lors du brasage à la puce électronique. L'ajout de quelques millimètres d'épaisseur de support temporaire vient rapidement corriger la situation afin de donner un bon support de température ambiante jusqu'à la température de brasage.

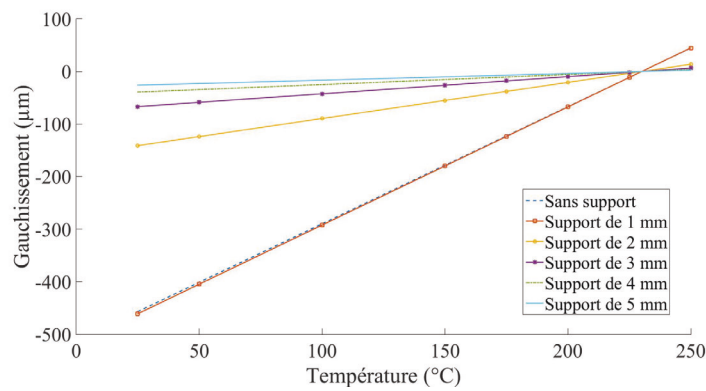
Les résultats précédants ne représentent pas tout à fait la réalité du projet puisque les perforations du support temporaire ont été ommises. Il a été possible de simuler les perforations sur le support temporaire à l'aide de Frisky, mais des limitations de programmation ont empêché de générer une simulation exacte du support temporaire usiné. La figure 4.4 présente l'allure du support temporaire utilisé dans les simulations. Les perforations de forme carrée sont de 2,5 mm par 2,5 mm dont le pas est de 4 mm.

La figure 4.5 montre des gauchissements similaires à la figure 4.3, mais cette fois, en se servant de supports temporaires perforés. Les perforations dans le support temporaire viennent affecter de manière assez visible le gauchissement total des assemblages en nécessitant cette fois au moins 3 mm d'épaisseur dans la région du site de brasure afin de compenser les forces générées par la différence de CET. La région extérieure au site de brasure se comporte de manière similaire à ce qui est observé à la figure 4.3b, mais les gauchissements sont augmentés vu la plus faible rigidité du support temporaire lorsqu'il y a présence de perforations.

Suite au brasage à la puce électronique, il est aisé de faire des simulations à l'aide de Frisky en réinsérant les propriétés mécaniques adéquates de la puce électronique et de l'underfill. La figure 4.6 présente le gauchissement des assemblages dans la région du site de brasure et sur la surface extérieur du site de brasure respectivement avec les propriétés



(a) Gauchissement dans la région du site de brasure



(b) Gauchissement extérieur au site de brasure

Figure 4.3 Gauchissement à différentes températures du site de brasure et de l'extérieur du site de brasure pour assemblage standard et assemblage avec support temporaire sans perforations. Toutes les simulations ont été ajustées pour avoir une température d'équilibre de 230 °C. Des simulations à 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 175 °C, 200 °C, 225 °C et 250 °C ont été faites.

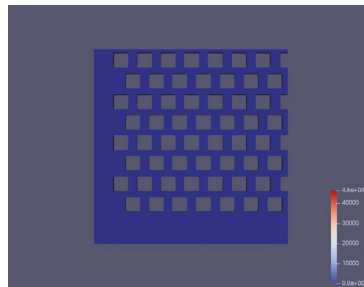
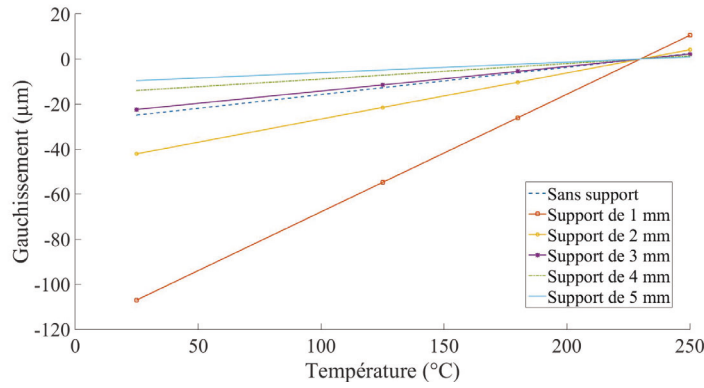
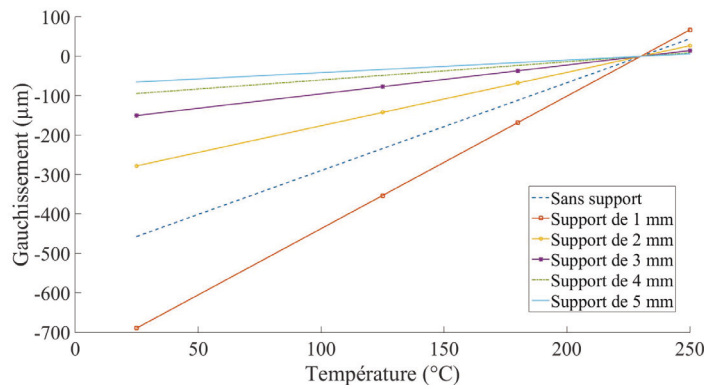


Figure 4.4 Motif du support temporaire perforé pour simulation Frisky. Seul un quart du support a été imagé pour correspondre aux simulation Frisky. La puce électronique serait située dans le coin supérieur droit dans le cas présent. Les trous sont de 2,5 mm par 2,5 mm avec un pas de 4 mm et positionnés en motif triangulaire.



(a) Gauchissement dans la région du site de brasure

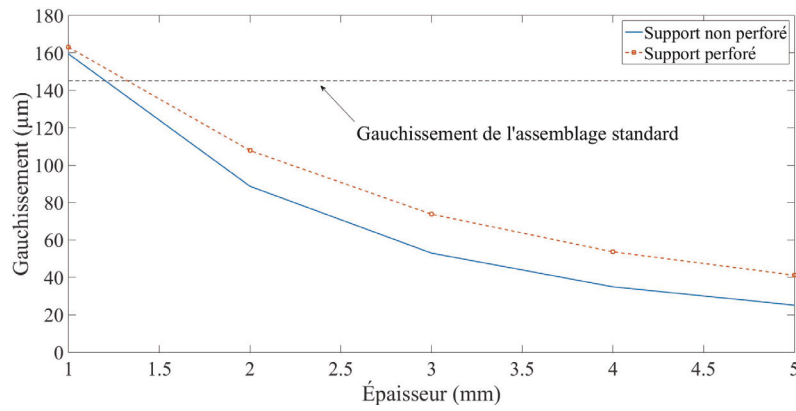


(b) Gauchissement extérieur au site de brasure

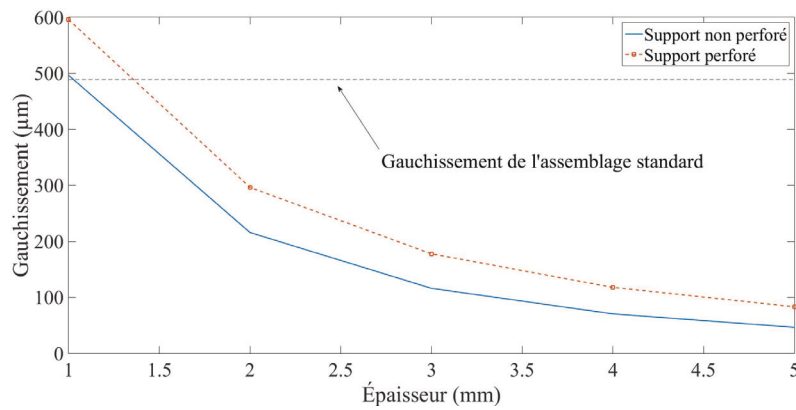
Figure 4.5 Gauchissement à différentes températures du site de brasure et de l'extérieur du site de brasure pour assemblage standard et assemblage avec support temporaire avec perforations. Toutes les simulations ont été ajustées pour avoir une température d'équilibre de 230 °C. Des simulations à 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 175 °C 200 °C, 225 °C et 250 °C ont été faites.

mécaniques normales de puce électronique et d'underfill. Il est facilement possible de voir que les perforations dans le support temporaire d'aluminium augmentent le gauchissement de l'assemblage en général vu la plus faible rigidité effective du support temporaire. 1 mm d'épaisseur de support temporaire n'améliorer pas la situation du gauchissement total de l'assemblage en raison de la différence de CET, mais 5 mm d'épaisseur de support temporaire vient amplement corriger la situation autant dans la région du site de brasure (41,2  $\mu\text{m}$  contre 145,2  $\mu\text{m}$ ) que dans la région extérieure au site de brasure (83,1  $\mu\text{m}$  contre 488,6  $\mu\text{m}$ ).

Bien que Frisky soit un environnement puissant et utile, il ne parvient pas à considérer les déformations plastiques qui dépendent d'un très grand nombre de facteurs. Ainsi, toutes les valeurs présentées dans cette section ne considèrent que les déformations élastiques. Par



(a) Gauchissement dans la région du site de brasure



(b) Gauchissement extérieur au site de brasure

Figure 4.6 Gauchissement simulé suite au brasage de la puce électronique et de l'ajout de l'underfill. La température d'équilibre a été posée à 150 °C et les simulations ont été effectuées à 25 °C pour comparaison avec assemblages expérimentaux.

exemple, la diminution de rigidité du BB305 en température qui pourrait potentiellement provoquer un relâchement des contraintes à l'interface entre le laminé et le support temporaire ne sont pas considérées tout comme le fluage des *chip bumps* une fois le brasage à la puce électronique complété. Cet élément est à garder en tête puisque cela peut être une des raisons pour lesquelles les simulations peuvent différer des résultats expérimentaux.

## 4.2 Évaluation du contrôle du gauchissement des laminés par l'usage d'adhésif et support temporaire

Afin de parvenir à bien mesurer le gauchissement du laminé sur sa surface totale, mais aussi dans la région du site de brasure, les tests faits ici sont des excursions en température similaires aux températures qu'il pourrait y avoir lors du brasage de la puce électronique au laminé comme effectué à la section 3.1.3. En se servant du TherMoiré comme appareil de mesure, les montages utilisés pour faire les mesures sont présentés à la figure 4.7. Chaque laminé est soumis à deux excursions en température dans l'appareil TherMoiré. Une mesure est faite sans support temporaire, soit le montage présenté à la figure 4.7a, puis une seconde mesure est effectuée à l'aide d'un support temporaire comme présenté à la figure 4.7b. Dans ce dernier cas, des support de verre et d'aluminium sont comparés. Encore une fois, vu la sensibilité des laminés à l'humidité comme mentionné à la section 3.1.3, un procédé (8h à 125 °C) de désorption de l'humidité emprisonnée dans les couches des laminés est effectué avant d'effectuer une excursion en température. L'omission de cette étape peut résulter en des boursouffures, soit des délaminations dans les couches du laminé, causées par la pression générée par l'ébullition de l'eau rendant le laminé non-fonctionnel et les valeurs de gauchissement non-représentatives.

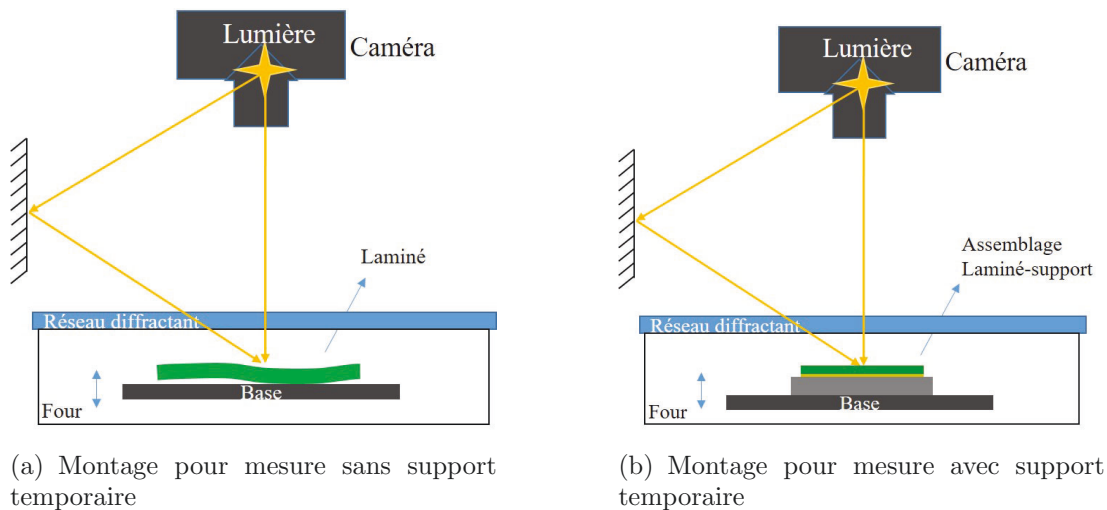


Figure 4.7 Montage au TherMoiré permettant la mesure du gauchissement des échantillons avec et sans support temporaire.

### 4.2.1 Adhésif BB305

En gardant en tête que le CET des laminés a une valeur de 20 ppm/K et que le verre utilisé a un CET de 0,55 ppm/K, la figure 4.8 présente le gauchissement avec et sans support temporaire de verre lors d'une excursion en température. Il est possible de voir



qu'à mi-chemin dans la montée en température, le gauchissement du site de brasure collé sur le support temporaire de verre tend à être très similaire au gauchissement naturel du laminé sans support temporaire. Conséquemment, une amélioration du gauchissement peut être observée suivant le collage, mais cette réduction de gauchissement n'est pas maintenue lors de l'excursion en température. Bien que la température de collage soit très élevée (200-230 °C présenté à la section 3.5), la différence avec l'excursion en température présentée ici, hormis la température plus haute, est que le laminé est soumis à une pression continue tout au long du collage jusqu'à ce que l'assemblage revienne à température ambiante. Par conséquent, même si l'adhésif est plus souple à haute température vu sa nature thermoplastique, la pression est appliquée jusqu'à ce que l'adhésif se solidifie à plus basse température. Malgré les hautes contraintes une fois solidifié (présentées à la section 3.3), l'adhésif parvient à maintenir le laminé en place sur le support temporaire avant la montée en température. Mais, une fois l'excursion en température débutée et sans présence d'une pression continue, les contraintes présentes par la différence de CET et la hausse de température deviennent trop importantes pour bien contrôler le gauchissement du site de brasure et du laminé.

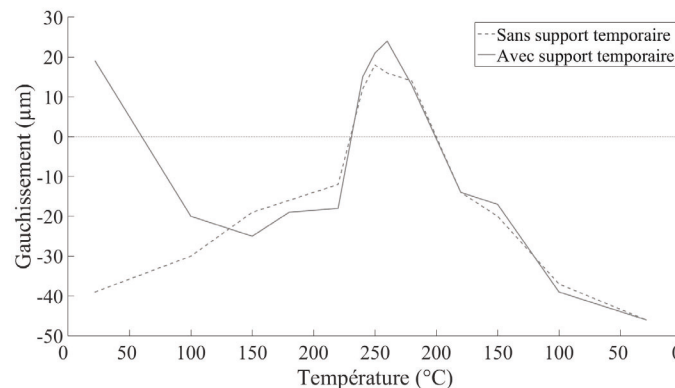


Figure 4.8 Gauchissement du site de brasure en température avec BB305 sur support temporaire de verre.

L'usage d'un support temporaire en aluminium, plutôt qu'un support en verre, diminue grandement les contraintes grâce à son CET plus proche de celui du laminé comme présenté à la section 3.3. Ces forces semblent suffisamment faibles pour maintenir le gauchissement du site de brasure relativement stable tout au long de l'excursion en température comme le présente la figure 4.9 lorsqu'un support temporaire d'aluminium non-perforé de 5 mm d'épaisseur est utilisé. Par conséquent, le choix du type de support temporaire utilisé pour procéder au collage est définitivement une composante critique de l'assemblage qui est fait lors de ce projet de recherche.

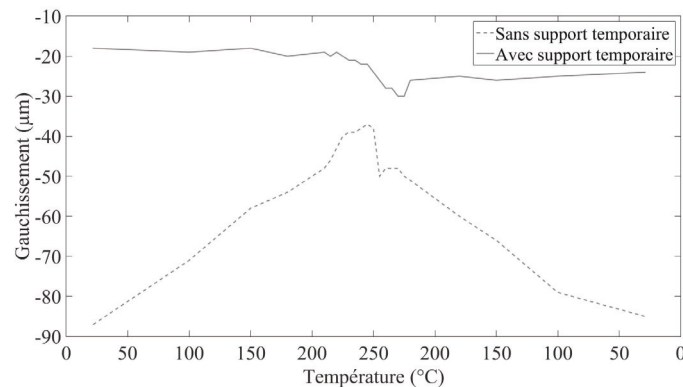


Figure 4.9 Gauchissement du site de brasure en température avec BB305 sur support temporaire d'aluminium.

#### 4.2.2 Adhésif HD3007

L'usage d'un support temporaire en verre combiné à l'adhésif HD3007 est encore une fois non fructueux comme c'est le cas pour le BB305, mais la réponse observée diffère grandement vu les propriétés différentes de l'adhésif. En effectuant un collage en appuyant sur le site de brasure combiné aux poids périphériques, il est possible de voir le résultat du collage à la figure 4.10. Le verre a brisé sous les contraintes générées par la différence de CET entre le verre et le laminé (forces évaluées à la section 3.3). Les propriétés thermodurcissables du HD3007 ne permettent pas de relaxation des contraintes une fois l'assemblage de retour à température ambiante. Ainsi, lorsque l'assemblage est retourné à température ambiante, soit le plus grand écart de température par rapport à la température de collage, les contraintes en jeu étaient trop grandes pour le verre.

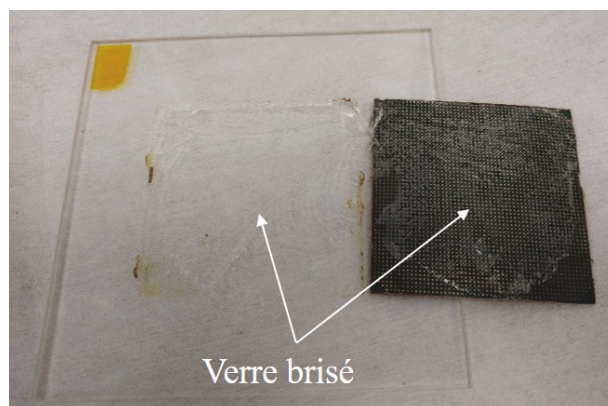


Figure 4.10 Résultat du collage d'un laminé sur un support temporaire en verre.

L'usage d'un support temporaire en aluminium de 5 mm d'épaisseur a été plus fructueux, mais a nécessité de l'optimisation. La figure 4.11 présente le gauchissement en température

d'un premier essai de collage sur support temporaire d'aluminium non perforé cuit sur une plaque chauffante en appuyant uniformément sur tous les *chip bumps* du laminé à une température supérieure à 200 °C (le senseur de température était approximatif) pendant 3 minutes. Bien que le gauchissement ne soit pas bien contrôlé comme le BB305 sur support temporaire d'aluminium, un comportement différent de la tendance naturelle du laminé sans support temporaire est observé. En effet, le gauchissement à la fin de l'excursion en température est le même qu'avant de débiter l'excursion en température. Ceci laisse croire que l'adhésif est en mesure de maintenir une force d'adhésion, mais que le processus de collage pourrait être optimisé.

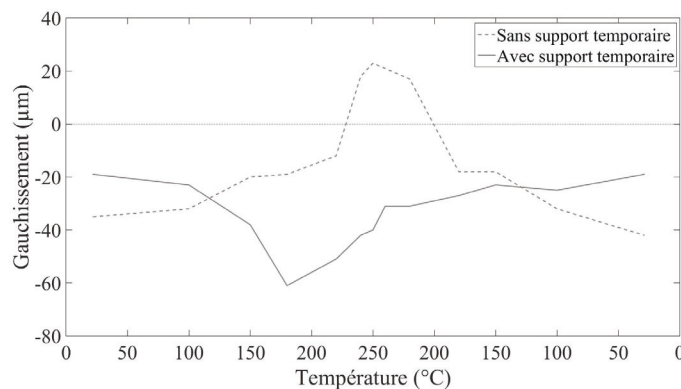


Figure 4.11 Gauchissement d'un laminé collé sur support temporaire d'aluminium non perforé à l'aide d'une plaque chauffante.

La figure 4.12 présente le gauchissement d'un site de brasure collé sur support temporaire d'aluminium perforé cuit dans un four azoté monté à 210 °C et maintenu à cette température pendant 10 minutes. Contrairement à la cuisson faite sur plaque chauffante, le gauchissement oscille autour de 0 µm, mais reste tout de même très variable et laisse penser que la cuisson requiert davantage d'optimisation.

Dans un espoir de permettre au HD3007 de se polymériser davantage, le temps de cuisson a été augmenté à 30 minutes tout en restant à la même température, soit 210 °C. Par contre, la situation par rapport au gauchissement ne semble pas s'améliorer en observant la figure 4.13. Conséquemment, le temps de cuisson n'est peut-être pas une variable importante pour le contrôle du gauchissement à cette température.

Comme montré à la figure 4.14, une cuisson dans un four azoté à une température de 230 °C pendant 20 minutes permet de donner des résultats améliorés de contrôle du gauchissement bien qu'il soit possible d'observer une variation de gauchissement positif à gauchissement négatif à certaines températures. En étudiant les formes du site de brasure, il est possible de conclure que cette variation provient ultimement du fait que la hauteur des coins du site

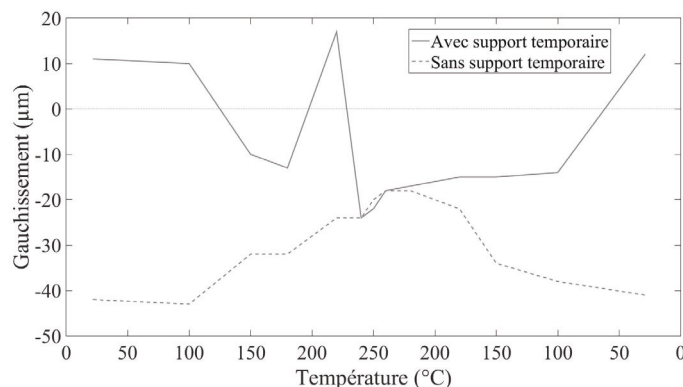


Figure 4.12 Gauchissement d'un laminé collé sur support temporaire d'aluminium perforé dans un four azoté à 210 °C pendant 10 minutes.

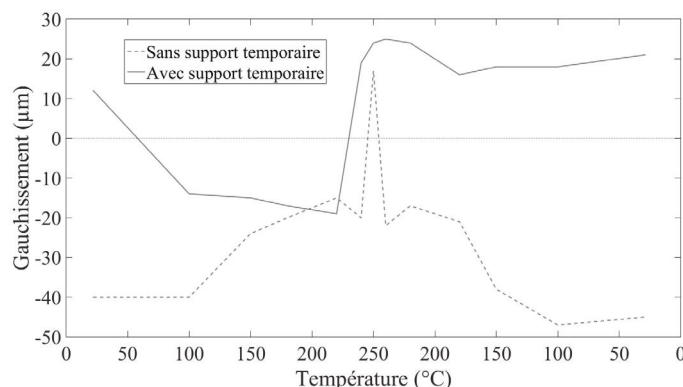


Figure 4.13 Gauchissement d'un site de brasure collé sur support temporaire d'aluminium perforé dans un four azoté à 210 °C pendant 30 minutes.

de brasure est très similaire à la hauteur du centre de site de brasure et fait ultimement varier le signe du gauchissement sans causer une grande variation dans la forme du site de brasure. La figure 4.15 montre la forme du site de brasure aux températures où le gauchissement change de signe.

Étant donné certaines restrictions de disponibilité des pièces et des limites de temps de cuisson acceptables en production, ces résultats ont été considérés comme suffisants pour une preuve de concept d'assemblage. Cependant, des essais additionnels seront à considérer pour mieux déterminer les paramètres optimaux.

Tandis que ces résultats reflètent bien les tendances prédites par les simulations Frisky effectuées à la section précédente, il reste toujours certaines différences. Alors que le gauchissement devrait tendre à être pratiquement nul (figure 4.5) selon les simulations qui assume une température d'équilibre à 230 °C, les résultats expérimentaux observés ici montrent les meilleurs gauchissements s'approchant difficilement sous les 10  $\mu\text{m}$ . Plusieurs

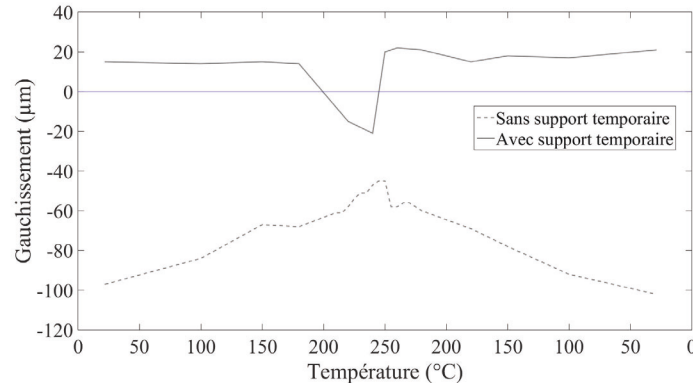


Figure 4.14 Gauchissement d'un site de brasure collé sur support temporaire d'aluminium perforé dans un four azoté à 230 °C pendant 20 minutes.

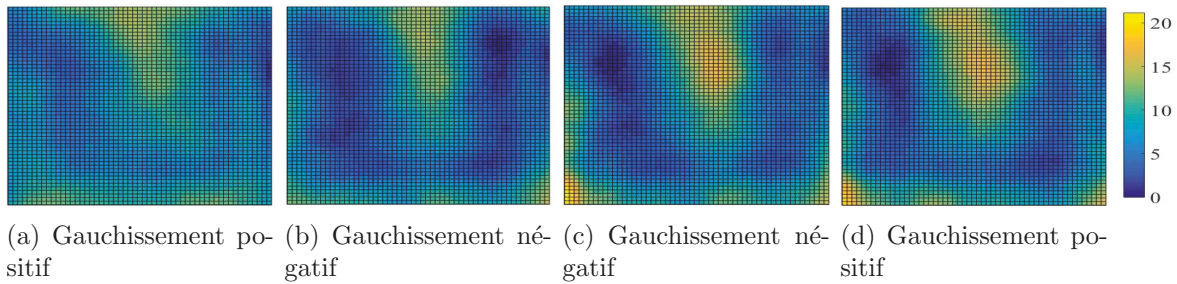


Figure 4.15 Comparaison visuelle du site de brasure entre le gauchissement positif et gauchissement négatif de la figure 4.14 où (a) est à 180 °C, (b) est à 220 °C, (c) est à 240 °C et (d) est à 250 °C.

facteurs peuvent être la cause de ces différences, mais une des plus évidentes est l'impossibilité d'avoir des conditions de collage parfaites d'un point de vue expérimental. Comme il a été possible de l'observer à la figure 3.31, la qualité de l'interface peut difficilement être uniforme, qui plus est, sur un support perforé, la tâche est encore plus difficile. De plus, comme les déformations plastiques ne sont pas considérées dans l'environnement Frisky, ceci peut être une seconde source d'erreur.

### 4.3 Assemblage complet d'un laminé à la puce électronique à l'aide de la solution d'adhésif temporaire

Toutes les étapes précédentes ont été faites dans l'optique de préparer le mieux possible l'assemblage complet et s'assurer que toutes les étapes nécessaires pour l'assemblage à l'aide d'un adhésif et support temporaire soient possibles. Afin de déterminer le bénéfice d'un tel type d'assemblage, 4 cellules représentant 4 types d'assemblage ont été proposés pour effectuer des comparatifs. Les 4 assemblages, décrits dans les prochains paragraphes, sont :

- Assemblage standard de IBM-Bromont
- Assemblage simple
- Assemblage à l'aide de l'adhésif HD3007 avec support temporaire d'aluminium perforé
- Assemblage à l'aide de l'adhésif BB305 avec support temporaire d'aluminium perforé

L'assemblage standard est le processus utilisé par IBM-Bromont pour l'assemblage de laminé coreless, et est donc considéré l'assemblage de référence sur lequel les autres cellules d'assemblage sont comparées. Tandis qu'il n'est pas spécifiquement indiqué pour les différents types d'assemblage, un procédé de désorption de l'humidité est fait avant d'effectuer une excursion thermique, et ce pour chaque type d'assemblage. Le procédé d'assemblage coreless est considéré confidentiel pour IBM-Bromont. Toutefois, étapes habituelles d'assemblage présentées à la section 1.1 sont respectées et des méthodes confidentielles à IBM-Bromont sont employées pour réduire le gauchissement.

Un second assemblage sans adhésif a aussi été utilisé pour comparatif comme présenté à la figure 4.16 et sera appelé assemblage simple. Contrairement à l'assemblage standard, aucune méthode confidentielle à IBM-Bromont n'est utilisée pour contrôler le gauchissement pour cet assemblage.

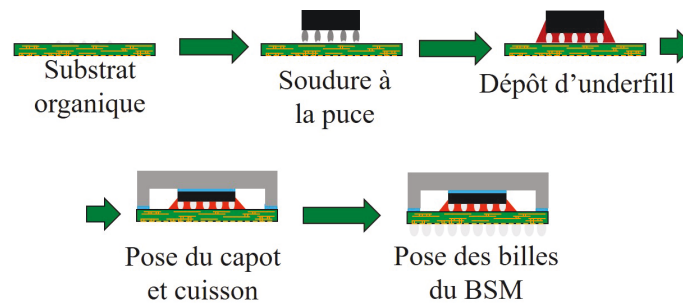


Figure 4.16 Procédé d'assemblage simple.

La version simplifiée pour l'assemblage par collage temporaire est présentée à la figure 4.17 qui est en fait un rappel de la figure 3.1. Vu l'importante augmentation de l'épaisseur du dispositif à assembler lorsque le support temporaire est utilisé, la pose du capot n'a pas été effectuée correctement. Ceci ne compromet pas la qualité des autres étapes d'assemblage et permet d'obtenir des mesures pertinentes quant à la hauteur des C4 qui est l'intérêt principal de ce projet de recherche, mais fausse les résultats d'épaisseur de TIM. Des ajustements au profil de brasage de la puce électronique ont dû être faits pour compenser la masse thermique du support temporaire, mais n'ont pas causé de modifications majeures. Les changements au profil initial ont toutefois été réduits le plus possible.

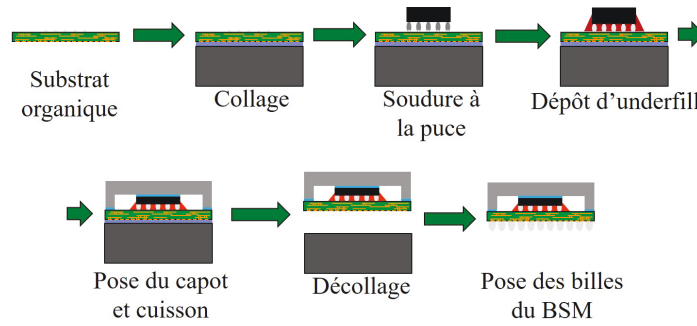


Figure 4.17 Procédé d'assemblage par collage temporaire.

Plusieurs mesures destructives et non destructives ont été effectuées sur ces 4 cellules d'assemblage. En plus des mesures de gauchissement et cambrure faites avant et après chaque étape d'assemblage, la figure 4.18 présente les procédures qui nécessitaient une dépendance par rapport aux étapes d'assemblage. Quelques mesures, telles que l'observation par rayons X et les tests d'arrachement de puce électronique ont été prises, mais n'ont révélé aucun défaut majeur parmi les différentes cellules étudiés. Les résultats ne sont donc pas présentés pour ces tests. Le nombre restreint de pièce par cellules étant une cause potentielle de ces résultats, des tests de production de masse pourraient être pertinents dans le futur du projet de recherche.



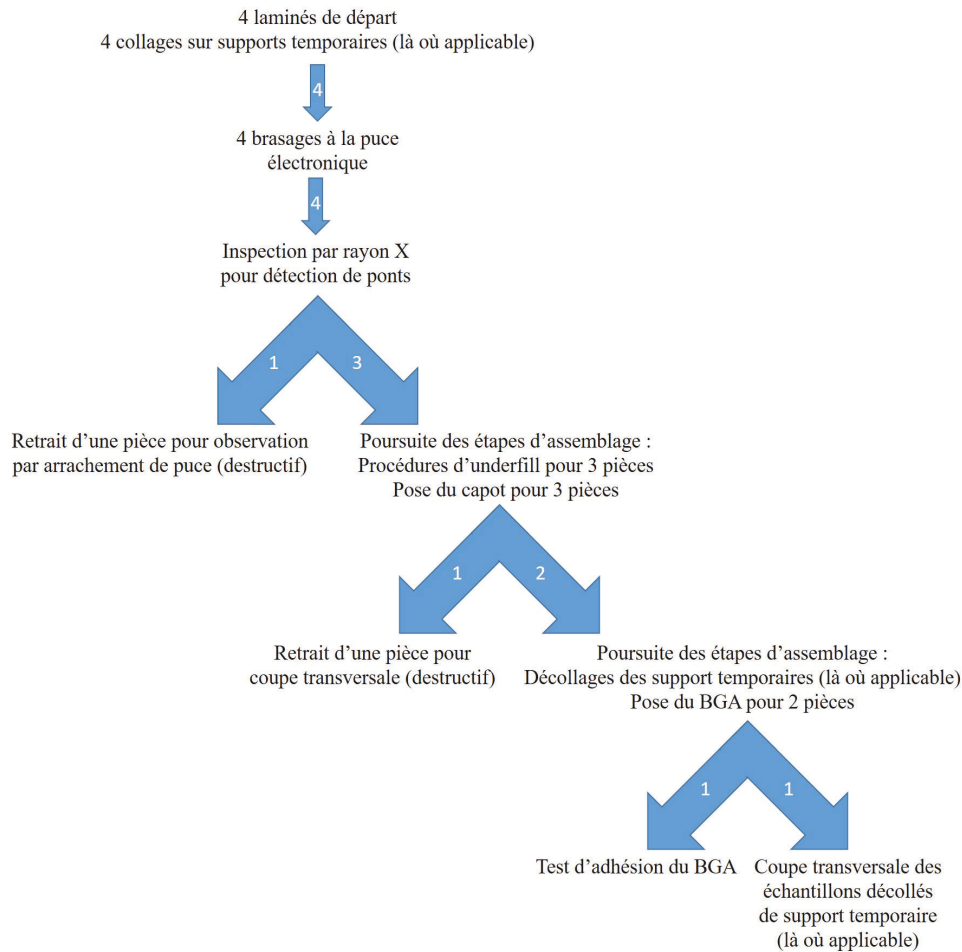


Figure 4.18 Mesures et tests effectués au cours des différents assemblages. Chaque cellule contient 4 pièces initialement et deux tests destructifs sont effectués sur chaque cellule (résultant au retrait de 2 pièces par cellules au cours de l'assemblage). Les chiffres dans les flèches correspondent aux nombre de pièces prenant cette avenue.



### 4.3.1 Gauchissement du site de brasure

La figure 4.19 présente le gauchissement en valeur absolue de la région du site de brasure du laminé et la cambrure de la puce pour les étapes où il n'est pas possible de mesurer directement le gauchissement du laminé. Le gauchissement a été mesuré à l'aide du TherMoiré, alors que la cambrure de la puce électronique a été faite par mesure laser en plusieurs points sur la puce.

Dans les étapes de brasage à la puce et de l'underfill, le gauchissement est significativement plus faible dans la région du site de brasure pour les assemblages par adhésif que les 2 autres assemblages. Les deux adhésifs se sont comportés d'une façon très similaire à l'exception de la mesure post CJ. L'hypothèse derrière cette difficulté à maintenir une valeur de gauchissement basse pour le BB305 est que la cambrure de la puce électronique est survenue uniquement suite à la solidification des C4 après le brasage à la puce électronique. Un des éléments importants pouvant faire varier les valeurs de gauchissement est le couplage du laminé à la puce électronique qui n'était pas considéré dans les excursions en température effectuées à la section 4.2. Ce couplage vient induire un grand stress vu l'importante différence de CET entre la puce électronique et le laminé et le BB305 plus souple en température laisse la puce se cambrer plus aisément même si une amélioration notable est visible par rapport à l'assemblage standard. En ce qui concerne le HD3007, sa nature thermodurcissable vient contrebalancer de manière très efficace les contraintes générées par la différence de CET entre le laminé et la puce électronique et empêche cette dernière de se cambrer. Basé sur ces comportements, les deux adhésifs testés parviennent à remplir leur but principal, soit de réduire le gauchissement pour l'étape critique du brasage à la puce électronique. Cependant, une fois le support temporaire décollé, il ne semble pas y avoir d'amélioration notable sur le gauchissement final des assemblages dans la région du site de brasure. Ceci propose que l'épaisseur du TIM entre la puce électronique et le capot ne sera pas améliorée dans l'assemblage final. Le gauchissement des assemblages après la pose des billes, établi par une mesure de planéité des billes, augmente d'une façon similaire pour toutes les cellules et peut être expliqué par la variabilité normale du diamètre des billes. Dans le cas de l'assemblage par HD3007, l'état du BSM du laminé après le décollage n'a pas permis de procéder à la pose des billes, mais un comportement en gauchissement similaire aux autres assemblages serait attendu après la pose des billes.

En ce qui concerne les assemblages sans collage temporaire, les mesures prises pour contrôler le gauchissement lors de l'assemblage ont réussi à minimiser les variations de gauchissement avant et après le brasage à la puce électronique dans la région du site de brasure.

---

Toutefois, le gauchissement est toujours nettement plus élevé que ce qui peut être observé dans les assemblages par collage temporaire.

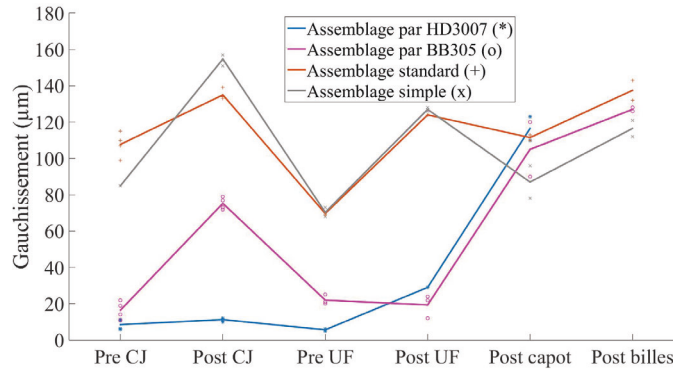


Figure 4.19 Gauchissement et cambrure en valeur absolue dans la région du site de brasure lors d'un assemblage complet. Les abréviations CJ, UF, capot et billes signifient respectivement brasage à la puce, underfill, pose du capot et pose du BGA. Les préfixes utilisés « pre » et « post » signifient une mesure immédiatement avant et immédiatement après l'étape d'assemblage respectivement. Le gauchissement sur le TSM du laminé a été mesuré à pre CJ, la cambrure a été mesurée pour les étapes post CJ, pre UF, post UF et le gauchissement du laminé BSM a été mesuré pour les étapes post capot et post billes une fois le laminé décollé du support temporaire.

Si les valeurs expérimentales de gauchissement du site de brasure avant le brasage sont comparées aux valeurs simulées par Frisky, il est possible d'observer quelques différences. Alors que les valeurs expérimentales sont de  $-16,5 \mu\text{m}$  pour le BB305 et  $-8,5 \mu\text{m}$  pour le HD3007 (les valeurs du graphique sont en valeur absolue), les simulations Frisky donnent  $-9,6 \mu\text{m}$ . Frisky a permis une bonne évaluation qui se trouve exactement dans le même ordre de grandeur que les résultats expérimentaux. Comme mentionné dans la section 4.1, les déformations plastiques ne sont pas considérées ici, mais les simulations s'approchent suffisamment des résultats expérimentaux en ne considérant que les déformations élastiques.

Suite au dépôt de l'underfill, les simulations Frisky montrent une cambrure de puce électronique plutôt élevée par rapport à ce qui est observé dans les résultats expérimentaux. Les assemblages par BB305 et par HD3007 donnent des cambrures de puce électronique de  $19,3 \mu\text{m}$  et  $29 \mu\text{m}$  respectivement, alors que Frisky simule  $41,2 \mu\text{m}$  (figure 4.6). Une des différences majeures ici peut être relié aux hypothèses faites dans Frisky où tous les composants sont assemblés lorsqu'ils sont parfaitement parallèles les uns aux autres et cet alignement parfait peut ultimement générer un plus grand stress que ce qu'il y aurait en

réalité. Il y aurait nécessairement un plus grand gauchissement induit par ce plus grand stress dans l'assemblage simulé.

### 4.3.2 Gauchissement du laminé

La figure 4.20 résume les gauchissements en valeur absolue des différents processus d'assemblage pour le laminé excluant la région du site de brasure. Ce gauchissement présente une tendance similaire à la région du site de brasure. Il est possible d'observer un gauchissement plutôt stable et faible lors des étapes de brasage à la puce électronique et d'underfill. Le gauchissement augmente une fois le laminé décollé du support temporaire pour les mesures de gauchissement après la pose du capot et la pose du BGA. Comme mentionné lors de l'étude du gauchissement de la région du site de brasure, le BSM de l'assemblage par HD3007 n'a pas permis de faire la pose du BGA sur le BSM.

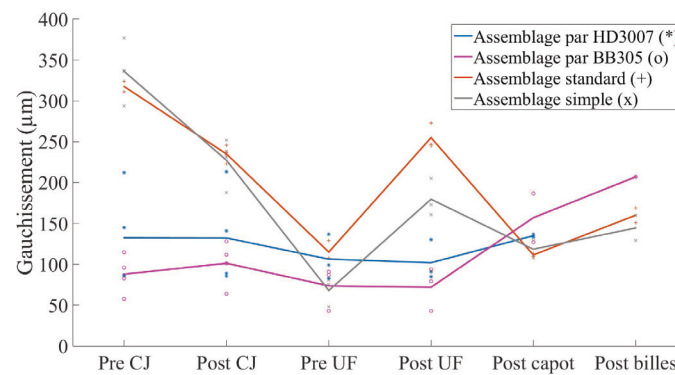


Figure 4.20 Gauchissement en valeur absolue sur la surface du laminé excluant la région du site de brasure lors d'un assemblage complet. Les abréviations CJ, UF, capot et billes signifient respectivement brasage à la puce, underfill, pose du capot et pose du BGA alors que les préfixes utilisés « pre » et « post » signifient une mesure immédiatement avant et immédiatement après l'étape d'assemblage respectivement. Le gauchissement sur le TSM du laminé a été mesuré à pre CJ, post CJ, pre UF, post UF et le gauchissement du laminé du côté BSM a été mesuré pour les étapes post capot et post billes une fois le laminé décollé du support temporaire.

Lorsque ces valeurs expérimentales sont comparées à des simulations Frisky, il est possible d'observer des différences notables. Avant le brasage à la puce électronique, le laminé total a un gauchissement expérimental de  $-88 \mu\text{m}$  pour le BB305 et  $-132,5 \mu\text{m}$  pour le HD3007 et Frisky simule un gauchissement de  $-65,1 \mu\text{m}$ . Encore une fois, la faible rigidité du laminé par rapport au support temporaire et la bonne épaisseur du support temporaire permettent un bon contrôle du gauchissement en simulation, mais les imperfections d'assemblage expérimental viennent induire une grande différence de gauchissement entre les simulations et les expériences. Les variations d'épaisseur potentiel d'adhésif et la qualité d'adhésion

des adhésifs vient donner des causes d'erreur qui peuvent jouer sur le gauchissement expérimental. En effet, bien que des mesures aient été prises pour limiter le gauchissement à l'extérieur du site de brasure en positionnant des poids en périphérie (figures 3.23d et 3.34), les coins des laminés étaient souvent ce qui causait un plus grand gauchissement. Il est possible d'observer ce comportement à la figure 4.21 qui présente le gauchissement d'un laminé collé à un support temporaire précédant le brasage à la puce électronique.

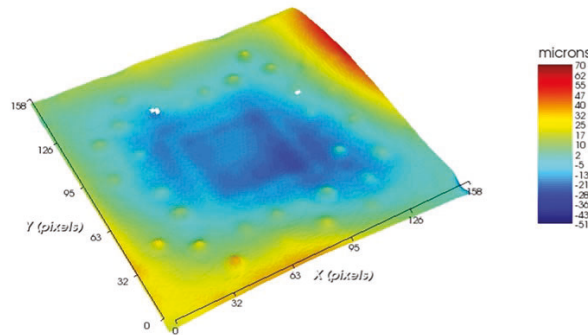


Figure 4.21 Gauchissement d'un laminé collé à un support temporaire précédant le brasage à la puce électronique.

Après le brasage à la puce électronique et le dépôt de l'underfill, l'assemblage expérimental par BB305 a donné un gauchissement moyen de  $72\text{ }\mu\text{m}$  et celui du HD3007,  $102\text{ }\mu\text{m}$ . Frisky simule un gauchissement de  $83,1\text{ }\mu\text{m}$  (figure 4.6). Bien que les gauchissements soient comparables, les résultats de gauchissement ne proviennent pas de la même région de l'assemblage. Alors que les assemblages expérimentaux obtiennent ce gauchissement en raison des coins surélevés des laminés, les simulations Frisky montrent une déflexion graduelle partant du site de brasure en allant vers les extrémités du laminé comme il est possible de le voir à la figure 4.22. La simulation assume ici un collage parfait entre les deux pièces et donc un bon couplage entre le laminé et le support temporaire. De manière expérimentale, les résultats montrent que le collage n'est pas parfait et peut être une cause du gauchissement expérimental plus haut que celui simulé dans Frisky. Ceci laisse penser que des optimisations sur la qualité de l'interface entre le laminé et le support temporaire sont encore possibles. Un meilleur collage permettrait à l'assemblage de bénéficier encore plus de la rigidité du support temporaire et pourrait réduire davantage le gauchissement des assemblages faits à l'aide d'adhésifs temporaires, bien que le gauchissement est déjà grandement réduit par rapport à l'assemblage standard.

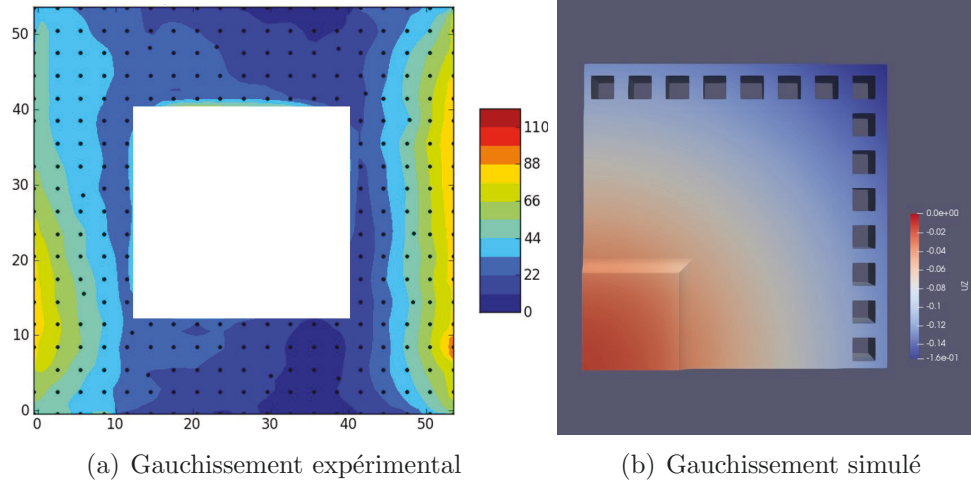


Figure 4.22 Gauchissement expérimental en (a) et simulé en (b) pour comparaison de la provenance du gauchissement dans chaque assemblage. Le centre de l'assemblage expérimental en (a) a été caché afin d'omettre la puce et l'underfill qui obstruent la mesure dans cette région.

### 4.3.3 Décollage des laminés

Comme présenté à la section 3.7, les deux adhésifs nécessitent deux méthodes de décollage différentes et les mêmes montages présentés à cette section (figures 3.43 et 3.45) ont été utilisés pour le décollage des assemblages complets.

La figure 4.23 présente l'inspection visuelle du BSM de deux laminés suite au décollage de l'assemblage par HD3007. Le solvant a visiblement endommagé les surfaces exposées du laminé malgré le fait que la séparation de ces assemblages a été accompli beaucoup plus rapidement par rapport au laminés seuls (section 3.7), soit moins de 10 minutes. Ce décollage plus rapide pourrait être expliqué par les forces de gauchissement beaucoup plus grandes dans le cas d'un assemblage complet. En effet, la plus grande rigidité de la puce électronique, des C4 et de l'underfill par rapport au laminé seul peut facilement induire de grandes forces de gauchissement. Ainsi, l'interface entre le support temporaire et le laminé s'en trouve étirée et facilite la pénétration du solvant dans les régions qui ne sont pas exposées directement au solvant contrairement aux zones perforées du support temporaire.

Par contre, même si cette plus grande force induite par le gauchissement est bénéfique pour l'étape de dissolution du HD3007, le BSM du laminé n'en est pas moins abîmé et induit des délaminations dans les régions où l'adhésif est en processus de dissolution. La figure 4.24 représente bien cette problématique. C'est pour cette raison que l'assemblage par HD3007 présenté ici n'a pas pu poursuivre l'étape suivant la pose du capot, soit la

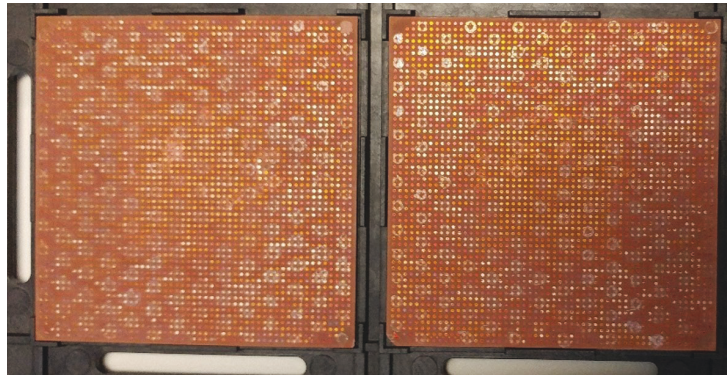


Figure 4.23 Aspect visuel après décollage du BSM des laminés collés à l'aide du HD3007 sur support temporaire d'aluminium perforé puis décollés.

pose du BGA. Malgré ce point négatif quant à cet adhésif, cela ne signifie pas qu'il est inutilisable pour le présent projet. Le contrôle du gauchissement a été réussi en utilisant un type de support temporaire particulier, mais il n'est pas exclu que d'autres supports temporaires parviennent tout aussi bien à contrôler le gauchissement des laminés tout en permettant un meilleur processus de dissolution d'adhésif pour le HD3007. L'étape de dissolution du HD3007 semble nécessiter encore beaucoup d'optimisation avant d'être considérée totalement fonctionnelle.

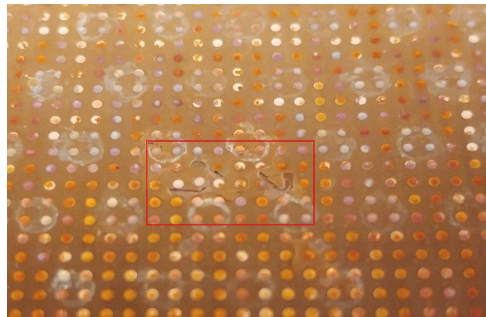


Figure 4.24 Vue rapprochée après décollage du BSM d'un des laminés collé à l'aide du HD3007 sur support temporaire perforé.

La figure 4.25 présente l'inspection visuelle du BSM de deux laminés suite au décollage de l'assemblage par BB305. Contrairement au cas du HD3007, les laminés ne semblent pas abîmés. La présence d'une puce électronique n'apporte pas de différence aux expérimentations effectuées sans puce électronique. Seules des marques dans les régions de perforation du support temporaire sont observables. Ceci peut être causé par les différentes excursions en température que le laminé a subi qui provoque une décoloration du masque de soudure (« *solder mask* »). La topologie n'est toutefois pas affectée même si le BSM est altéré visuellement.



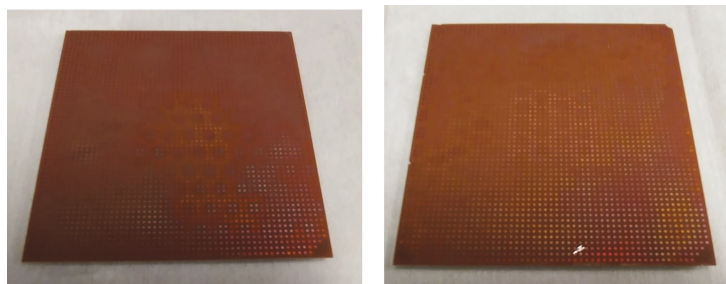


Figure 4.25 Aspect visuel après décollage du BSM des laminés collés à l'aide du BB305 sur support temporaire d'aluminium perforé.

#### 4.3.4 Pose du BGA

Le bon état du BSM des laminés collés par BB305 a permis de facilement procéder à la pose du BGA. L'inspection visuelle du BGA n'a pas révélé de complications et toutes les billes ont solidement été soudées aux plots du BSM comme le montre la figure 4.26.

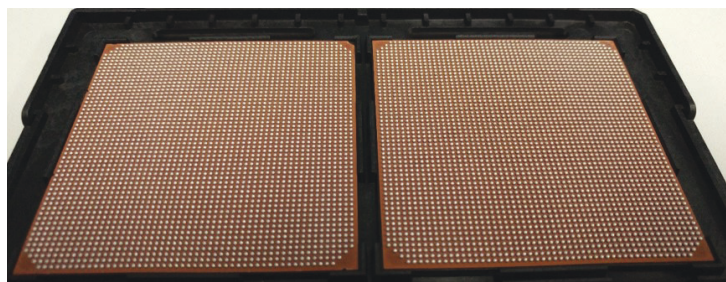


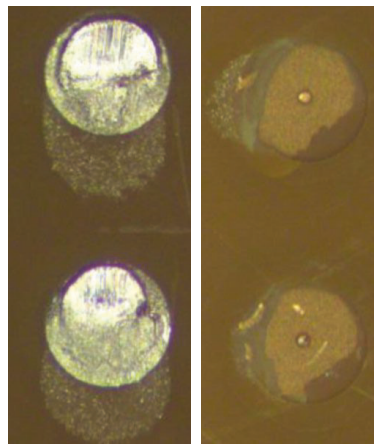
Figure 4.26 Aspect visuel du BGA sur assemblage par BB305.

Des tests d'adhésion quantitatifs ont aussi été faits pour s'assurer de la qualité de pose du BGA sur le BSM. À titre comparatif, ces mêmes tests d'adhésion ont été faits sur les BGA des laminés ayant passé par l'assemblage standard. Les résultats sur 30 billes de chaque laminé sont présentés au tableau 4.3. Le mode de rupture recherché est la rupture de bille puisque la rupture de coussinet laisse voir qu'un autre type de problème non relié à l'adhésion directe des billes sur les plots du laminé est problématique. La figure 4.27 présente les deux modes de rupture observés lors des tests d'adhésion. Malgré une consistance supérieure en mode de rupture pour l'assemblage par BB305 par rapport à l'assemblage standard, la similarité en force suggère qu'un procédé de collage temporaire utilisant le BB305 ainsi que son décollage n'a pas d'effets sur l'intégrité du procédé de pose du BGA.

Tableau 4.3 Résultat de test d'adhésion des billes du BGA des laminés.

Assemblage standard		Assemblage par BB305	
Force appliquée (gr·force)	Mode de rupture	Force appliquée (gr·force)	Mode de rupture
943	Rupture de bille	984	Rupture de bille
894	Rupture de bille	1282	Rupture de bille
903	Rupture de coussinet	1120	Rupture de bille
985	Rupture de coussinet	1078	Rupture de bille
1102	Rupture de coussinet	1119	Rupture de bille
822	Rupture de bille	1130	Rupture de bille
1203	Rupture de coussinet	1121	Rupture de bille
1148	Rupture de coussinet	1003	Rupture de bille
1086	Rupture de bille	834	Rupture de bille
1052	Rupture de bille	1119	Rupture de bille
1087	Rupture de coussinet	1060	Rupture de bille
912	Rupture de coussinet	1261	Rupture de bille
1245	Rupture de coussinet	1132	Rupture de bille
1065	Rupture de coussinet	1165	Rupture de bille
1061	Rupture de bille	1246	Rupture de bille
821	Rupture de coussinet	944	Rupture de bille
1091	Rupture de bille	1017	Rupture de bille
1093	Rupture de bille	1100	Rupture de bille
1152	Rupture de bille	1109	Rupture de bille
952	Rupture de bille	1118	Rupture de bille
950	Rupture de bille	936	Rupture de bille
1088	Rupture de coussinet	877	Rupture de bille
1041	Rupture de bille	1184	Rupture de bille
1161	Rupture de coussinet	1107	Rupture de bille
1048	Rupture de bille	1001	Rupture de bille
1059	Rupture de bille	835	Rupture de bille
1058	Rupture de bille	945	Rupture de bille
1130	Rupture de bille	1115	Rupture de bille
1118	Rupture de bille	783	Rupture de bille
1012	Rupture de coussinet	1094	Rupture de bille
Moyenne : 1043	$\sigma = 103,32$	Moyenne : 1061	$\sigma = 123,48$





(a) Rupture de bille  
(b) Rupture de coussinet

Figure 4.27 Mode de rupture des billes du BSM pour tests d'adhésion de bille sur laminés assemblés par BB305 et par assemblage standard.

### 4.3.5 Coupe transversale des assemblages complets

Les coupes transversales permettent d'appuyer la plupart des mesures effectuées dans les sections 4.3.1 et 4.3.2 en plus de confirmer certaines hypothèses apportées. La coupe transversale a été effectuée le long de la diagonale de l'assemblage afin d'observer les zones où les contraintes de CET sur les C4 étaient les plus visibles. En effet, les C4 situés dans les coins de la puce électronique sont les plus éloignés du centre de l'assemblage où la différence de CET induit le plus grand écart dans l'alignement des *chip bumps* au fil des multiples excursions en température. La figure 4.28 montre la manière dont l'assemblage a été coupé pour étudier les différentes couches et permet aussi de montrer les points de référence pour les prochaines mesures et images listées dans cette section.

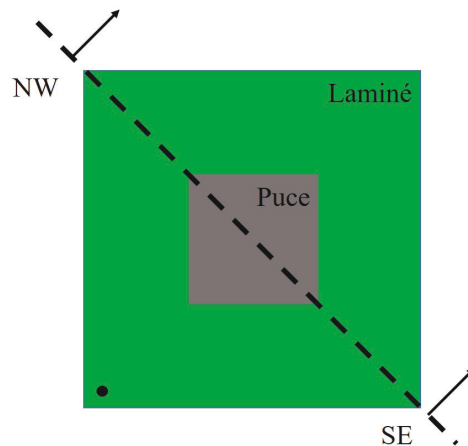
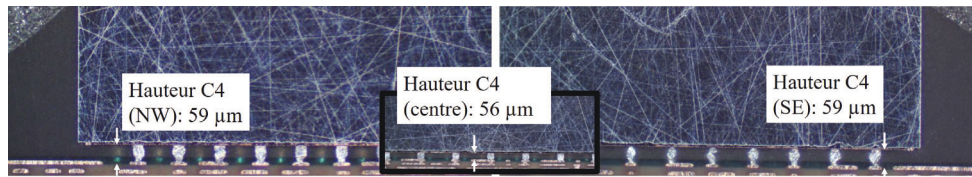


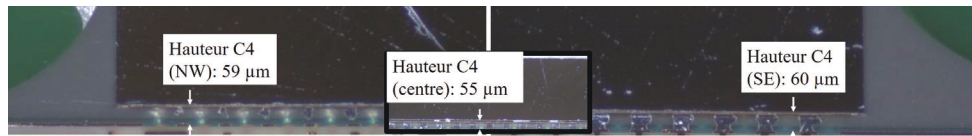
Figure 4.28 Schéma montrant l'angle dans lequel l'assemblage a été coupé pour étudier les différentes couches de l'assemblage.

La hauteur des C4 est présentée à la figure 4.29. Les coupes transversales des assemblages par adhésif sont ici encore collés sur les supports temporaires. Afin d'obtenir une mesure adéquate des différentes épaisseurs, un polissage grossier a été utilisé. La même hauteur de C4 (55-56  $\mu\text{m}$ ) est observée pour les divers assemblages en leur centre (point neutre). Cependant, ce n'est pas le cas pour les C4 en périphérie des assemblages. La variation des hauteurs de C4 des assemblages par adhésif est beaucoup plus faible que celle des l'assemblages sans collage temporaire. La possibilité qu'il y ait présence de pont ou de joints partiels ou ouverts est ainsi grandement réduite. En observant les gauchissements différents des deux assemblages par collage temporaire dans la région des sites de brasure directement après le brasage à la puce électronique (post CJ à la figure 4.19), l'hypothèse que la cambrure de la puce survient uniquement une fois que les C4 sont solidifiés est confirmée. Tandis que les coupes transversales ont été prises en présence du support temporaire, aucun changement dans la forme des C4 n'est attendu à la suite du décolage en raison

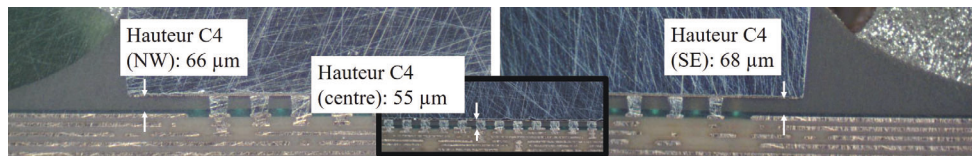
de la présence de l'underfill. L'assemblage standard par rapport à l'assemblage simple (4.29c et 4.29d) produit des résultats qui pourraient limiter l'apparition de ponts entre les C4 de la périphérie mais pourrait toujours induire une grande probabilité de mauvais contacts, ou de contacts partiels. Ainsi, une différence par rapport aux assemblages par collage temporaire est toujours notable et augmente donc considérablement les risques de défauts reliés au gauchissement. En outre, les variations de hauteur de C4 et d'épaisseur de l'underfill peuvent être une raison supplémentaire pour laquelle les simulations de Frisky diffèrent des résultats expérimentaux. Frisky considère que tous les éléments assemblés sont parallèles les uns aux autres à la température d'équilibre et cela comprend aussi les C4. Une future implémentation dans l'environnement Frisky où il est possible de varier le profil des C4 et de l'underfill sous la puce électronique pourrait être pertinent pour rapprocher les simulations de la réalité.



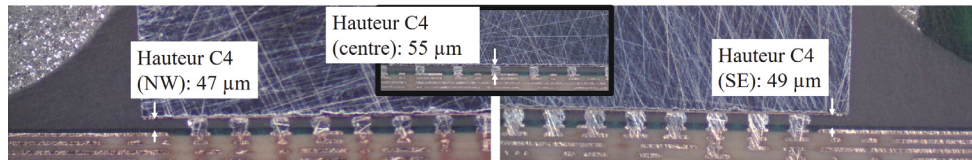
(a) Assemblage par HD3007 sur support temporaire



(b) Assemblage par BB305 sur support temporaire



(c) Assemblage standard



(d) Assemblage simple

Figure 4.29 Coupe transversale des processus d'assemblage standard, simple et par collage temporaire pour l'évaluation de la hauteur des C4.

Le raffinement du polissage a permis d'étudier plus aisément la géométrie des C4. Les figures 4.30, 4.31, 4.32 et 4.33 montrent la géométrie des C4 plus en détail sur les différentes cellules d'assemblage dans les régions du centre de la puce et des côtés NW et SE. L'as-

semblage standard laisse entrevoir une forme de C4 très étirée en périphérie par rapport aux C4 du centre et concorde très bien avec les hauteurs de C4 présentées à la figure 4.29. Les deux assemblages par adhésif présentent des C4 à hauteurs plus constantes, mais la différence de CET a visiblement eu un grand impact sur la forme des C4 en périphérie. Les brasures apparaissent bien complètes malgré tout dans les échantillons étudiés. L'assemblage standard semble lui aussi être affecté par le CET, mais la plus haute taille des C4 semble minimiser l'effet du CET. L'assemblage simple, quant à lui, semble avoir été grandement affecté par l'absence des techniques de contrôle du gauchissement utilisées par IBM-Bromont et la différence de CET. En résumé, les assemblages par adhésif semblent un bon compromis qui limitent la compression ou l'allongement des C4 et donnent de faibles déformations de cisaillement dans la plupart des cas sur les C4 en périphérie de la puce.

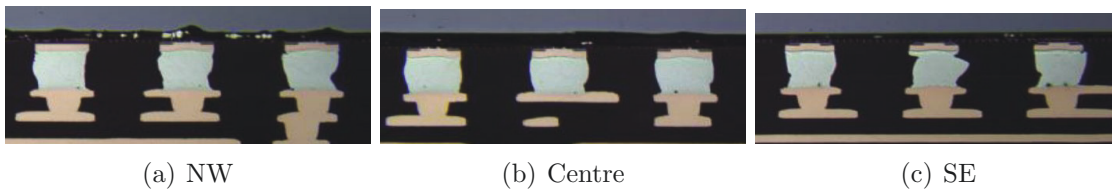


Figure 4.30 Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage par HD3007.

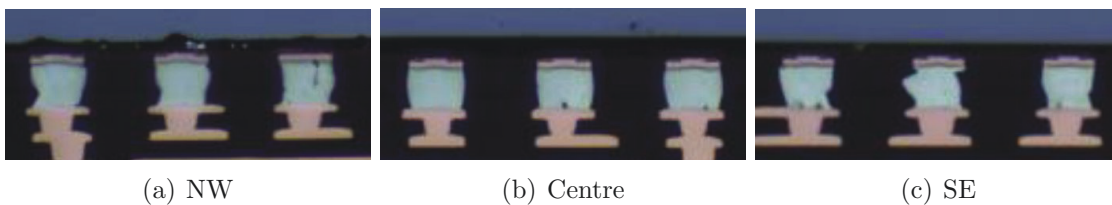


Figure 4.31 Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage par BB305.

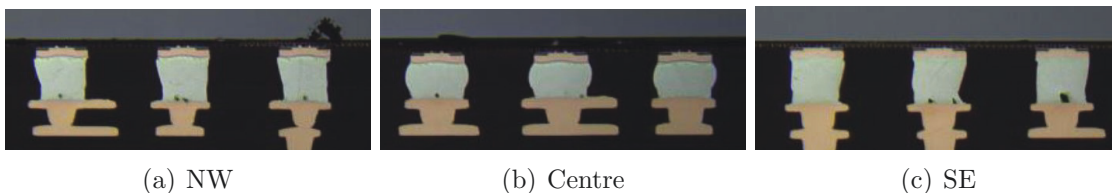


Figure 4.32 Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage standard.

En ce qui concerne l'épaisseur du TIM qui est présentée à la figure 4.34, seul l'assemblage standard semble bénéficier d'un avantage par rapport aux autres assemblages. Par contre, lorsque toujours collés aux supports temporaires, les deux assemblages par collage temporaire ont permis de maintenir une épaisseur de TIM plus constante que les assemblages sans collage temporaire. En outre, il est possible de remarquer que le TIM de l'assemblage par BB305 n'a pas le même comportement que tous les autres assemblages en ayant une

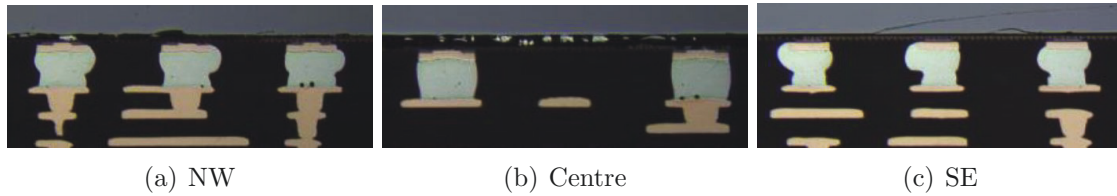
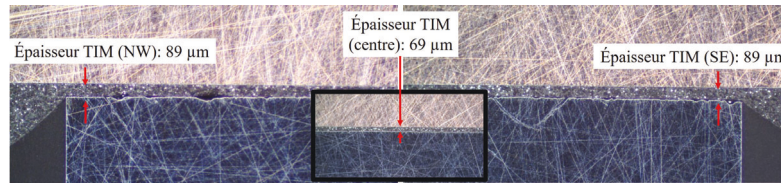


Figure 4.33 Coupe transversale des C4 du processus d'assemblage simple sans poids périphérique.

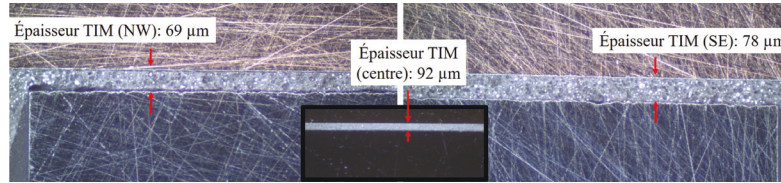
épaisseur de TIM au centre de la puce ( $92\text{ }\mu\text{m}$ ) plus grande que sa périphérie ( $69\text{--}78\text{ }\mu\text{m}$ ). Les mesures de cambrure de puce électronique précédant la pose du capot suggèrent des réponses partielles en observant la figure 4.35 : un certain défaut pourrait avoir causé une dépression dans le silicium de la puce électronique donnant une épaisseur plus grande de TIM dans cette région précise. De plus, la forme du capot pourrait aussi avoir causé une plus grande accumulation de TIM au centre de la puce électronique. Des tests supplémentaires seraient nécessaires pour conclure la raison de cette forme inattendue de TIM avec assurance. La faible quantité d'échantillons pour ces assemblages a toutefois limité la possibilité de faire cette investigation. Il est aussi possible d'observer un vide de TIM à la figure 4.34c, mais comme il est en périphérie de la puce électronique et non au-dessus de la puce, la dissipation thermique n'est pas un problème ici.

La figure 4.36 présente des coupes transversales des échantillons assemblés par collage temporaire, mais préparées une fois décollées des supports temporaires. Une comparaison aux mesures de gauchissement faites après la pose du capot (figure 4.19) laissent penser que le TIM s'est déformé suite au décollage du support temporaire. On conclut que le contrôle du gauchissement était grandement fait par le support temporaire, même une fois l'assemblage pratiquement complet (BGA manquant). Il reste par contre une incertitude quant au processus de pose du capot qui n'a pas été bien contrôlé. Il pourrait limiter l'épaisseur du TIM et potentiellement réduire l'amplitude de sa déformation une fois l'assemblage décollé du support temporaire. Une plus grande pression initiale avant la cuisson de la colle du capot pourrait être bénéfique pour les assemblages par adhésif en observant les coupes transversales. En effet, contrairement à l'assemblage simple qui, une fois la pression retirée, laisserait le TIM se déformer lorsque le laminé reprendrait sa forme, les laminés sur support temporaire sont maintenus immobiles pendant l'application de la pression pour la pose du capot. Ainsi, le TIM pourrait potentiellement s'amincir lors de l'application de la pression et ne pas se déformer une fois la pression retirée. Il faut toutefois garder en tête que le TIM et la colle du capot peuvent prendre de l'expansion lors de la cuisson et

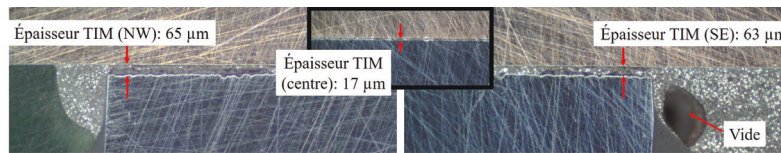




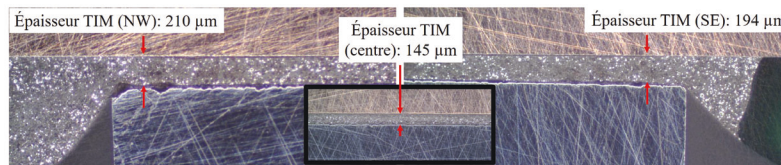
(a) Assemblage par HD3007 sur support temporaire



(b) Assemblage par BB305 sur support temporaire



(c) Assemblage standard



(d) Assemblage simple

Figure 4.34 Coupe transversale des processus d'assemblage standard, simple et par collage temporaire pour l'évaluation de l'épaisseur du TIM.

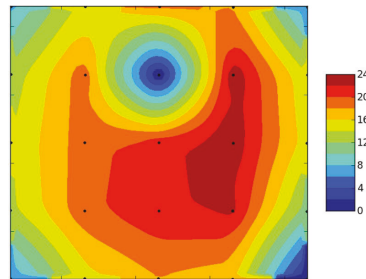


Figure 4.35 Cambrure en micromètres de la puce électronique de la figure 4.29c assemblée à l'aide du BB305 suite à l'étape d'underfill. Les points noirs représentent une mesure effectuée à ce point précis.

modifier l'épaisseur finale du TIM après la cuisson. Des travaux futurs sur ce sujet seraient pertinents.

Les coupes transversales ont aussi permis une vue sur l'épaisseur des adhésifs HD3007 et BB305 entre le laminé et le support temporaire comme il est possible de le voir aux figures

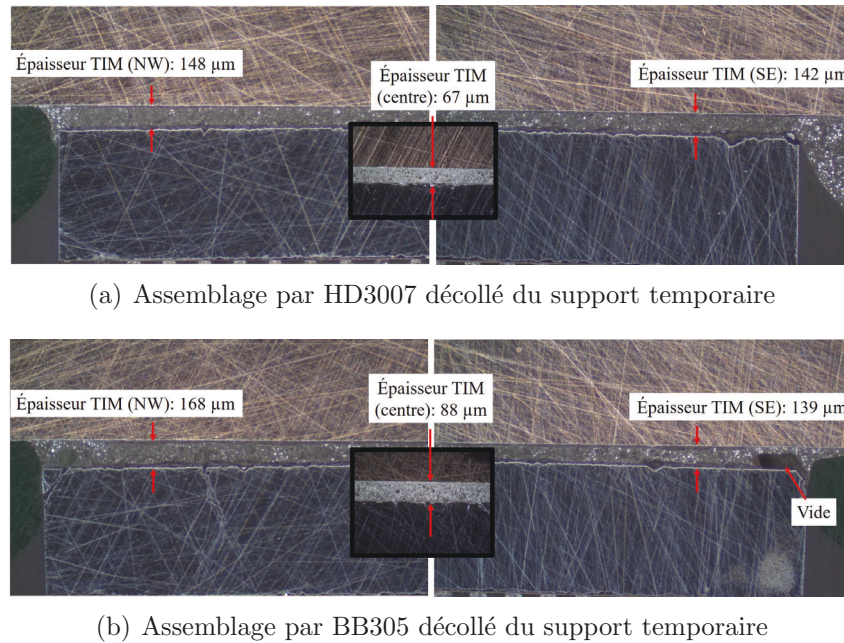


Figure 4.36 Coupe transversale des processus d'assemblage par HD3007 et par BB305 pour l'évaluation de l'épaisseur du TIM une fois les assemblages décollés du support temporaire.

4.37 et 4.38. Il est important de garder en tête que ces coupes transversales sont faites vers la fin de l'assemblage avant la pose du BGA et les assemblages ont donc traversé plusieurs excursions en température qui peuvent avoir modifié la répartition des adhésifs. Le processus de collage des laminés, le brasage à la puce électronique, la cuisson de la colle du capot et les multiples procédés de désorption de l'humidité dans le laminé ont contribué à ces multiples excursions en température. L'interface d'adhésif directement sous la puce électronique est manquante pour les deux assemblages par adhésif où il est possible d'observer un vide et l'épaisseur d'adhésif en périphérie de la puce semble absente. Bien que l'adhésif ne soit pas visible au microscope, l'adhérence des adhésifs est visible de plusieurs manières. En effet, les laminés sont solidement attachés aux supports temporaires et les valeurs de gauchissement des assemblages par collage temporaire sont significativement plus basses que les assemblages sans collage temporaire. La pression utilisée et la présence des perforations dans les supports temporaires ont certainement aidé la couche d'adhésif déposée à s'échapper pendant le processus de collage et ont résulté en une interface d'adhésif pratiquement nulle entre le laminé et le support temporaire. La figure 3.22, présentée dans la section 3.4 des techniques d'étalement, vient appuyer cette hypothèse bien que plusieurs autres tests seraient nécessaire pour convenablement identifier la source du problème. En outre, les montages de collage utilisés tirent avantage de la gravité pour appliquer la pression, mais les adhésifs sont aussi soumis à la gravité et ceci a pu encourager l'écoulement

de l'adhésif en-dehors de l'interface entre le laminé et le support temporaire. De plus, le brasage à la puce électronique et le dépôt de l'underfill sont des étapes générant beaucoup de contraintes mécaniques dans la région du site de brasure et la mince couche d'adhésif sous le site de brasure n'a pas pu empêcher un décollement indésirable de l'assemblage dans cette région.

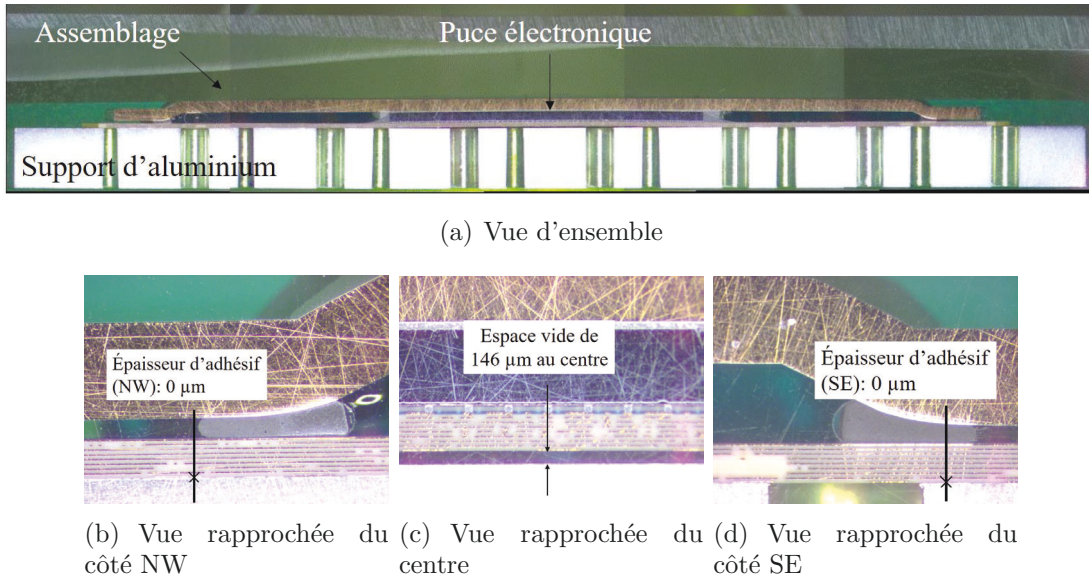


Figure 4.37 Coupe transversale du processus d'assemblage par HD3007 pour l'évaluation de l'épaisseur de l'adhésif entre le support temporaire et le laminé.

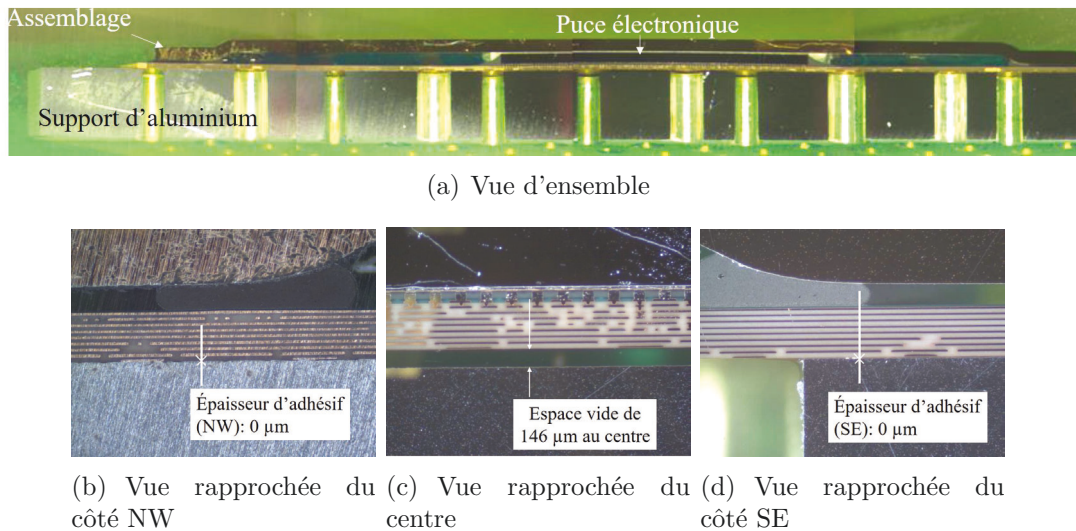


Figure 4.38 Coupe transversale du processus d'assemblage par BB305 pour l'évaluation de l'épaisseur de l'adhésif entre le support temporaire et le laminé.

Ultimement, dans les travaux futurs du projet, il pourrait être pertinent d'effectuer des coupes transversales à différentes étapes de l'assemblage pour comprendre à quel moment



l'adhésion dans la région du site de brasure est perdue. S'il était possible de trouver une technique rapide et facile pour empêcher cette perte d'adhésif, le contrôle du gauchissement pourrait en être amélioré. Il serait possible d'imaginer un montage pour l'étape de collage qui permettrait de tirer avantage de la gravité pour tenter de maintenir l'adhésif à l'interface entre le laminé et le support temporaire comme peut le présenter la figure 4.39. En effectuant le collage de cette manière sur un support temporaire perforé, les solvants présents dans l'adhésif peuvent s'évaporer à travers les trous sans permettre à l'adhésif de s'échapper des perforations. Basée sur les dernières coupes transversales, une plus faible masse pourrait aussi être utilisée lors de l'étape de collage vu les faibles forces nécessaires pour maintenir le laminé plat présenté à la section 3.1. Ces deux modifications sont facilement optimisables pour la région du site de brasure, mais le montage inversé rendrait le contrôle du gauchissement en périphérie du site de brasure (présenté à la figure 3.28) plus complexe.

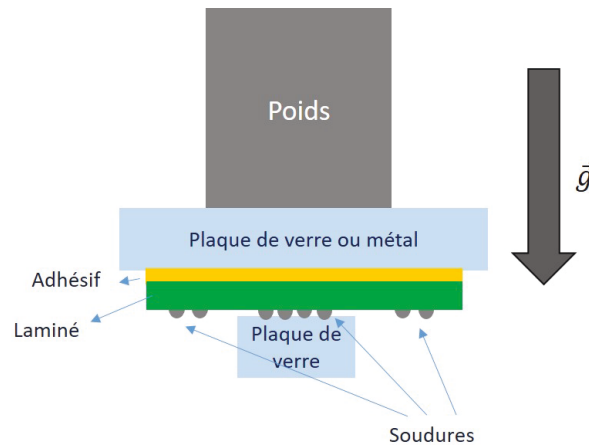


Figure 4.39 Montage tirant avantage de la gravité pour procéder à l'étape de collage du laminé au support temporaire.



# CHAPITRE 5

## Conclusion

### 5.1 Sommaire du projet

Le gauchissement est un élément constamment présent dans l'assemblage de puce électronique à leur laminé. Il l'a toujours été, mais atteint présentement des grandeurs de plus en plus critiques. Plusieurs méthodes ont été proposées dans le passé pour tenter de réduire, ou de contourner le problème de gauchissement présent dans les laminés et ainsi diminuer les mécanismes de défaillance présents dans les interconnexions entre la puce électronique et le laminé. Quelques techniques ont été concluantes, mais peuvent être coûteuses, ou peuvent limiter la production de masse pour une application industrielle. Ce projet avait pour but d'optimiser une méthode innovante dans le domaine de la mise sous boîtier microélectronique inspirée des supports temporaires de tranches de silicium (*temporary wafer carrier*) en utilisant un support et un adhésif temporaire lors de l'assemblage à la puce électronique.

Afin de parvenir à contrôler le gauchissement des laminés à travers un procédé d'assemblage à puce renversée par ce principe de collage temporaire, plusieurs tests, expériences et mesures ont été effectués. Ces étapes ont permis d'identifier certaines combinaisons concluantes, tout en identifiant les raisons spécifiques permettant le bon fonctionnement. Une des premières étapes nécessaires était de s'assurer que les adhésifs sélectionnés étaient suffisamment forts pour contrôler le gauchissement de laminés à toutes les températures d'un procédé d'assemblage à puce renversée. Pour cela, il a fallu bien sûr tester les adhésifs mécaniquement, mais aussi trouver une manière d'évaluer la force requise pour maintenir les laminés plats en température. Alors que cette force de gauchissement des laminés semble être de l'ordre de quelques centaines de pascals, la force des adhésifs se situe confortablement dans l'ordre des mégapascals pour le HD3007 et dans les kilopascals pour le BB305, que ce soit à température ambiante, ou à température élevée. En effet, pour le BB305, les résultats montrent qu'il y a une perte de rigidité de l'adhésif en température, mais sa force en tension est suffisante pour permettre le contrôle du gauchissement des laminés coreless en température.

L'étape suivante du projet de recherche était le design et la préparation des supports temporaires. Une plaque d'aluminium usinée permettait d'obtenir une bonne planéité et

un CET de support très proche de celui du laminé. Des perforations dans le support d'aluminium permettaient une évacuation adéquate des solvants lors de l'étape de collage et un bon accès à l'interface entre le support temporaire et l'assemblage pour le décollage, particulièrement dans le cas du HD3007 où le solvant utilisé endommageait l'assemblage.

Pour l'étape de collage du laminé au support temporaire, il était nécessaire de trouver une méthode adéquate d'étalement des adhésifs. Bien que plusieurs méthodes d'étalement aient été investiguées et pourraient potentiellement être fonctionnelles, l'optimisation de ces méthodes, ou l'accès à ces méthodes avec certains appareils et chimiques aurait nécessité de très longues périodes d'attente. La technique employée a ultimement été l'étalement par tournette puisqu'elle permettait une excellente uniformité d'étalement dans la région du site de brasure malgré la forme carrée du laminé qui pouvait causer des effets de bord à la périphérie du laminé et du support temporaire. Le choix d'étalement sur le laminé ou le support temporaire n'a pas affecté les résultats de gauchissement bien qu'il ait modifié des zones où les résidus se trouvaient une fois le décollage effectué pour le BB305.

La cuisson des adhésifs a aisément pu être faite pour permettre un contrôle du gauchissement suffisamment stable en fonction de la température lorsque les laminés étaient collés au support temporaire. Les cuissons proposées par les fabricants des adhésifs ont pu être adaptées aux besoins du présent projet assez rapidement pour le BB305 en utilisant un four pour la cuisson et le collage, mais a nécessité un peu plus de recherche dans le cas du HD3007. Comme ce dernier était recommandé pour des températures beaucoup plus hautes que celles utilisées ici, beaucoup plus de tests d'essais et d'erreurs ont été faits, mais ont permis de mieux comprendre l'adhésif et ont aussi permis de développer une cuisson combinée au collage efficace pour le contrôle du gauchissement de laminé.

Pour le décollage, le BB305 a pu être utilisé assez facilement selon ce qui était recommandé en procédant à un pelage, mais le HD3007 a une fois de plus nécessiter du travail de recherche. Comme les solutions développées pour cet adhésif provoquaient une dégradation des laminés, plusieurs tentatives ont été nécessaires pour convenir d'une méthode de décollage qui n'endommageait pas de manière critique le laminé. Un trempage à plusieurs reprises dans le solvant de dissolution a finalement permis un décollage adéquat.

Toutes ces étapes ont permis de tester la possibilité d'effectuer un procédé d'assemblage à puce renversée combiné à la solution de collage temporaire. Les tests finaux ont révélé que l'usage d'une telle technique permettrait de mieux contrôler le gauchissement dans la région du site de brasure, mais aussi dans la région extérieure au site de brasure et induire un meilleur contrôle sur la hauteur des C4 afin de réduire les risques de défauts reliés au

---

gauchissement. Bien sûr, le contrôle du gauchissement était grandement axé sur l'amélioration du brasage à la puce électronique, mais a aussi permis de réduire la cambrure de la puce et la variation d'épaisseur du TIM avant le décollage du support temporaire. De plus, le test d'assemblage complet a aidé à identifier les quelques failles restantes qui n'avaient pas pu être prévues dans les étapes précédentes. Un très bon exemple est l'étape de pose du capot de l'assemblage à puce renversée qui n'avait pas été testée préalablement et qui pourrait être optimisée pour amincir le TIM et maintenir son épaisseur plus uniforme sur la surface totale de la puce électronique. Un autre point très important et observé lors du test d'assemblage est le manque d'adhésif à l'interface entre le support temporaire et le laminé. Les simulations Frisky montrent qu'un meilleur collage permettrait un gauchissement plus faible pour le site de brasure, même s'il était plus grand à l'extérieur du site de brasure.

Ultimement, les précautions, les tests et procédés d'assemblage avec support temporaire ont permis une amélioration considérable du contrôle du gauchissement lors du procédé d'assemblage à puce renversée. À l'aide des résultats obtenus dans ce projet de recherche, il est aisé de dire que le gauchissement lors d'un procédé d'assemblage à puce renversée est réduit et apporte ainsi une grande réduction des risques de défauts causés par le gauchissement.

## 5.2 Contributions originales

Malgré la grande inspiration de l'industrie de la manipulation des tranches de silicium, ce projet a nécessité beaucoup d'ajustements et d'innovations. Plusieurs étapes et procédures n'étaient pas définies et nécessitaient un temps important de réflexion afin de recueillir des résultats significatifs ou obtenir un montage adéquat pour récupérer l'information souhaitée.

Une des différences majeures était le matériau, ou la pièce avec laquelle il était nécessaire de travailler. Plusieurs limitations, ou inconnues provenaient du laminé. La première différence concerne le CET qui était beaucoup plus élevé pour le laminé qu'une tranche de silicium. Conséquemment, les supports proposés par les fabricants d'adhésifs temporaires pour tranches de silicium sont généralement inadéquats en raison du CET très petit de ces supports. Il est aisé de travailler avec un support en verre, ou en silicium lorsque le matériau de travail est le silicium, mais l'usage des mêmes supports pour un laminé s'avère beaucoup plus complexe. En effet, du travail de recherche et d'usinage a été nécessaire pour s'assurer que le support temporaire apporterait un support adéquat sans induire de contraintes indésirables. Le support d'aluminium usiné avec perforations s'est avéré être

---

un excellent candidat par rapport au verre pour ce projet, alors que ce même support aurait probablement été inutilisable pour des applications mettant en jeu des tranches de silicium.

Une autre différence importante des laminés par rapport aux tranches de silicium est leur topologie et cette différence a pu être bien observée lors de ce projet. Bien que les deux types d'assemblage nécessitent d'être plats pour procéder à leurs différentes étapes d'assemblage (brasage à la puce pour le laminé et, par exemple, polissage pour la tranche de silicium), le laminé possède beaucoup plus de relief que la tranche de silicium comme mentionné à la section 3.1.1. Comme l'épaisseur de l'adhésif est du même ordre de grandeur, ou même plus faible, une application de la force inadéquate lors du collage du laminé au support temporaire pouvait limiter la qualité du collage et empêcher un bon contrôle du gauchissement. Plusieurs montages de collage ont dû être testés lors de ce projet afin de bien contrôler le gauchissement dans la région du site de brasure, mais aussi sur la surface totale du laminé. L'application d'un poids central et d'un second poids périphérique n'était pas la solution évidente au problème du collage, mais a été adoptée vu les bons résultats.

En ce qui concerne le collage, l'identification des adhésifs compatibles avec l'application souhaitée a été un autre élément critique du projet de recherche puisque les adhésifs employés devaient répondre à plusieurs critères qui ne sont généralement pas triviaux dans le domaine de la manipulation des tranches de silicium par adhésifs temporaires. La recherche littéraire était nécessaire à la réussite du projet afin d'identifier des adhésifs qui pouvaient être collés à des températures suffisamment basses pour ne pas déformer de manière irréversible les *chip bumps* tout en pouvant utiliser cet adhésif à des températures supérieures à celle du collage. De plus, plusieurs adhésifs utilisent des solvants pour effectuer le décollage et le nettoyage des adhésifs. Bien que le silicium et les métaux qui y sont déposés sont peu affectés par les solvants, un laminé peut facilement être attaqué par des solvants organiques comme il a pu être possible de le voir lors de l'usage du EKC830 et du EKC865 pour dissoudre le HD3007. La sélection des adhésifs était donc très importante et malgré que le BB305 et le HD3007 soient des candidats intéressants, il est encore nécessaire d'optimiser tous les paramètres de ces adhésifs. À l'évidence, les processus de cuisson et recuits optimisés des adhésifs a certainement permis un contrôle du gauchissement amélioré des laminés. Des recherches littéraires supplémentaires étaient toutefois nécessaires pour le HD3007 pour conclure qu'il pouvait être recuit à plus faible température que celle proposée par le fabricant. La nature thermoplastique du BB305 a aussi été d'un grand avantage pour le recuit et le collage de l'adhésif, mais n'était pas un processus bien connu ou expliqué par le fabricant.

---

Même si les adhésifs ont dû être optimisés afin de permettre un meilleur contrôle du gauchissement, les matériaux ont tous une limite mécanique qui ne peut pas être dépassée sans détruire le lien créé lors du collage entre le support temporaire et le laminé. Ainsi, il était nécessaire de savoir jusqu'à quel point les adhésifs devaient être forts. Alors que la force de tension des adhésifs était facilement évaluable, autant en haute température qu'à température ambiante, l'évaluation de la force nécessaire pour maintenir les laminés plats lors d'une excursion en température n'était pas aussi facile. Plusieurs montages ont été pensés et testés avant d'obtenir des résultats significatifs pour tous les types de laminés étudiés. Le montage Instron utilisé était théoriquement encourageant, mais des limitations pratiques ont rendu son usage limité vu les senseurs trop peu sensibles pour les faibles forces requises et le four limité en puissance. Le montage se servant du TherMoiré et de poids transparents, tel que proposé dans ce projet, a permis de faire cette évaluation de la force de contrôle du gauchissement de manière efficace et a permis de conclure que les forces nécessaires étaient beaucoup moindres que les limites mécaniques des adhésifs utilisés.

### 5.3 Travaux futurs

Les résultats présentés dans les sections précédentes laissent penser qu'il est possible de réduire le gauchissement lors du procédé d'assemblage à puce renversée chez IBM-Bromont. Mais en trouvant une solution au contrôle du gauchissement, plusieurs nouveaux questionnements émergent. Ainsi, comme conclusion du document, voici certaines pistes d'améliorations et études qui pourraient être pertinentes pour le futur du projet du contrôle du gauchissement lors d'assemblage à puce renversée.

Comme observée dans les coupes transversales, la délamination entre le site de brasure sur le laminé et le support temporaire (figures 4.37 et 4.38) pose des problèmes de contrôle du gauchissement et il serait intéressant de faire des coupes transversales à plusieurs moments de l'assemblage pour identifier le moment de défaillance de l'adhésif. De plus, cette défaillance pourrait potentiellement être corrigée en tentant un collage renversé comme il a été discuté à la figure 4.39 qui pourrait permettre une meilleure rétention de l'adhésif à l'interface entre le laminé et le support. En outre, l'étalement par tournette a été sélectionné pour permettre un étalement rapide et facilement optimisable, mais les autres techniques présentées ont un potentiel d'augmenter la compatibilité à une chaîne d'assemblage et pourrait aussi assurer un meilleur étalement dans certaines régions critiques qui ne peut pas être aussi bien contrôlé à l'aide d'une tournette. Ces techniques pourraient potentiellement mieux s'harmoniser à d'autres formes de support temporaires et ainsi limiter les dommages aux laminés.

---

Lors du test d'assemblage complet présenté à la section 4.3, la pose du capot a été un élément causant beaucoup de problématiques pour les assemblages par collage temporaire. Malgré l'importance secondaire dans ce projet de la pose du capot, sans cette étape, l'assemblage reste incomplet et doit donc obligatoirement être considéré dans la suite du projet. Bien que la pose du capot pourrait être effectuée sans l'usage du support temporaire, d'autres tests faisant varier la force utilisée pour étendre le TIM entre le capot et la puce seraient tout à fait logiques à effectuer lors de l'assemblage à l'aide du collage temporaire. Une étude sur les avantages et désavantages ainsi que les coûts de production des différentes méthodes devrait suivre pour identifier la meilleure approche à utiliser.

Les simulations faites à l'aide de Frisky ont permis de faire des évaluations intéressantes par rapport au gauchissement d'assemblages à puce renversée, mais quelques limitations du simulateur ont empêché d'approfondir encore plus les études faites à l'aide de l'outil de simulations. Une des différences majeures entre une simulation et la réalité peut se trouver dans les types de déformation, soit les déformations élastiques et plastiques. Ainsi, le glissement de l'adhésif qui peut survenir en raison de la différence de CET entre le laminé et le support temporaire ne peut pas être simulé tout comme le fluage des C4 qui est facilement visible lorsque des coupes transversales sont faites sur les assemblages réels (figures 4.30, 4.31, 4.32 et 4.33). De plus, la hauteur variable des C4 par rapport au centre et à la périphérie ne peut pas être observable dans les simulations et pourrait être un ajout intéressant dans Frisky pour observer la variation des contraintes.

Une des étapes nécessaires à la qualification complète de l'adhésif ayant réussi l'assemblage complet, soit le BB305, est un test de production de masse. Cela permettrait d'évaluer la robustesse de la solution en évaluant le taux de réduction des défauts, mais nécessite une quantité de pièces présentement indisponible.

---



# Annexes

Frisky contient beaucoup de paramètres qui peuvent être ajustés. Voici les principaux paramètres qui peuvent être ajustés. Il serait possible de présenter les paramètres permettant l'insertion des perforations dans le support temporaire, mais comme chaque trou est programmé manuellement, le tableau devient très volumineux et redondant. Chaque trou peut être fait dans le matériau de son choix, soit la puce, l'underfill, le laminé, le BGA et le PCB. Les coordonnées du trou sont aussi définies manuellement en indiquant la position en x et en y de deux coins opposés du trou.

Tableau 1 Paramètres de l'interface Frisky

comment	none	
die thickness [mm]	0.785	
custom underfill	True	
symmetry	quarter	
have underfill	True	
sealband Poisson ratio [dimensionless]	0.3	
type of analysis	structural	
lid-laminate edge spacing in x [mm]		1
lid-laminate edge spacing in y [mm]		1
TIM Poisson ratio [dimensionless]	0.3	
PCB Level	False	
calculation temperature [C]		25
sealband Conductivity [W/mK]	0.01	
TIM Conductivity [W/mK]	0.01	
underfill CTE [PPM/K]		30
TIM minimal thickness [mm]	0.015	
restricted underfill fillet height	False	
laminate name	Devil	
MTLIC	False	
TIM2 Conductivity [W/mK]	0.01	
lid type	Lidless	
stress-free temperature [C]		150
lid post Young modulus [MPa]		10000
3D die	False	
core thickness [mm]	0.4	
TIM2 Poisson ratio [dimensionless]	0.3	
TIM Young modulus [MPa]		10000
C4	False	
have fillet	True	
TIM CTE [PPM/K]		30

Tableau 2 Paramètres de l'interface Frisky (suite)

die material	Silicon	
lid material	Copper	
module type	SCM	
underfill Poisson ratio [dimensionless]	0.3	
fillet width [mm]	1.5	
lid post CTE [PPM/K]		30
heatsink	False	
TIM2 CTE [PPM/K]		30
lid post Conductivity [W/mK]	0.01	
TIM initial thickness [mm]	0.03	
die size y [mm]	20.5	
die size x [mm]	20.5	
stress extractor	False	
lid post Poisson ratio [dimensionless]	0.3	
sealband Young modulus [MPa]		10000
TIM2 Young modulus [MPa]		10000
thermal interface material	custom	
underfill thickness [mm]	0.055	
underfill Young modulus [MPa]		10000
sealband CTE [PPM/K]		30
underfill Conductivity [W/mK]	0.01	
fillet corner	True	
custom laminate	False	
laminate isothermal temperature [C]		25
resolution	standard	
z deformation (3D)		
ANSYS data URL	<a href="#">link</a>	
underfill rz corner stress [MPa]	50.581	
wall time [s]	502.6612448692322	
final module warpage [micron]	634.0913846000543	

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] P. Pierleoni, L. Pernini, A. Belli, and L. Palma, “An android-based heart monitoring system for the elderly and for patients with heart disease,” *International Journal of Telemedicine and Applications*, vol. 2014, no. 625156, pp. 1–11, 2014.
- [2] C. Emmanouilidis, R.-A. Koutsiamanis, and A. Tasidou, “Mobile guides : Taxonomy of architectures, context awareness, technologies and applications,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 103–125, 2013.
- [3] Statistique Canada, “Rapport de surveillance des communications 2015 : Système de communication du canada : Aperçu à l’intention des citoyens, des consommateurs et des créateurs.” <http://www.crtc.gc.ca/fra/publications/reports/policymonitoring/2015/cmr2.htm>, Octobre 2015. Accédé le 6 avril 2016.
- [4] Statistique Canada, “Technologie numérique et utilisation d’internet.” <http://www.statcan.gc.ca/daily-quotidien/140611/dq140611a-fra.htm>, Juin 2014. Accédé le 6 avril 2016.
- [5] *More Moore*, 2015.
- [6] H. H. Utsunomiya, “Challenge on packaging substrate technologies towards next decade,” in *2008 3rd International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference, IMPACT 2008*, pp. 307–310, 2008.
- [7] P. Borgesen, “Flip chip on organic substrates,” tech. rep., Universal Instruments Corporation, 2013.
- [8] K. S. and C. P., *Handbook of Electronic and Photonic Materials*, p. 1278. Springer, January 2006.
- [9] J. H. Lau, “Cost analysis : Solder bumped flip chip versus wire bonding,” *Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions*, vol. 23, no. 1, pp. 4–11, 2000.
- [10] N. C. Lee, *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting : SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies*, p. 219. Newnes, 2002.
- [11] H. K. Charles, *The Wirebonded Interconnect : A Mainstay for Electronics*. Springer, 2007.
- [12] S. Lee, M. J. Yim, R. N. Master, C. P. Wong, and D. F. Baldwin, “Void formation study of flip chip in package using no-flow underfill,” *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 31, no. 4, pp. 297–305, 2008. Cited By :15.
- [13] J.-M. Dorkel, “Semi-conducteurs de puissance - problèmes thermiques (partie 2),” *Technique de l’ingénieur - Composants actifs en électronique de puissance*, vol. base documentaire : TIB245DUO, no. ref. article : d3113, pp. 1–14, 2016. fre.
- [14] J. Kim, S. Lee, J. Lee, S. Jung, and C. Ryu, “Warping issues and assembly challenges using coreless package substrate,” in *IPC APEX EXPO 2012*, vol. 3, pp. 2023–2047, 2012.

- 
- [15] J. Kim, S. Lee, J. Lee, S. Jung, and C. Ryu, "Warpage issues and assembly challenges using coreless package substrate," in *IPC APEX EXPO 2012*, vol. 3, pp. 2023–2047, 2012.
  - [16] TeleGeography, "Global bandwidth research service executive summary." [https://www.telegeography.com/page\\_attachments/products/website/research-services/global-bandwidth-research-service/0005/9474/gb15-exec-sum.pdf](https://www.telegeography.com/page_attachments/products/website/research-services/global-bandwidth-research-service/0005/9474/gb15-exec-sum.pdf), 2015. Accédé le 6 avril 2016.
  - [17] Technical Standardization Committee on Semiconductor Device Package, "Measurement methods of package warpage at elevated temperature and the maximum permissible warpage," Tech. Rep. JEITA ED-7306, Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association, March 2007.
  - [18] T. Guenther, A. Mintri, W. W. Lim, L. H. Jung, T. Lehmann, N. H. Lovell, and G. J. Suaning, "Laser-micromachined, chip-scaled ceramic carriers for implantable neurostimulators," in *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, pp. 1085–1088, 2011. Cited By :2.
  - [19] B. Appelt, *Advanced substrates : A materials and processing perspective*, pp. 243–271. Materials for Advanced Packaging, Springer, 2009. Cited By :4.
  - [20] W. G. Petefish, D. B. Noddin, D. A. Hanson, R. E. Gorrell, and M. F. Sylvester, "High density organic flip chip package substrate technology," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1089–1097, 1998. Cited By :10.
  - [21] B. Siu, "Managing the interconnect continuum... from silicon to package and board," in *Proceedings of the IEEE 1999 International Interconnect Technology Conference, IITC 1999*, pp. 3–5, 1999. Cited By :1.
  - [22] H. P. Yeoh, M. . Lii, B. Sankman, and H. Azimi, "Flip chip pin grid array (fc-pga) packaging technology," in *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, EPTC*, vol. 2000-January, pp. 33–40, 2000. Cited By :5.
  - [23] M. Massénat, "Circuits en couches minces - mcm et techniques connexes," *Électronique - Automatique | Électronique*, 2003.
  - [24] W. S. Tsai, C. Y. Huang, C. K. Chung, K. H. Yu, and C. F. Lin, "Generational changes of flip chip interconnection technology," in *2017 12th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, pp. 306–310, Oct 2017.
  - [25] R. Kaysar and M. Ahsan, "A review on laser processing in electronic and mems packaging," *Journal of Electronic Packaging*, 2017.
  - [26] L. Valdevit, V. Khanna, A. Sharma, S. Sri-Jayantha, D. Questad, and K. Sikka, "Organic substrates for flip-chip design : A thermo-mechanical model that accounts for heterogeneity and anisotropy," *Microelectronics Reliability*, vol. 48, no. 2, pp. 245–260, 2008. Cited By :14.
  - [27] S. Pharand. Personal communication, 02 2019.
  - [28] N.-P. Goodhue, D. Danovitch, J. Moussodji, B. Papineau, and E. Duchesne, "Warpage control during mass reflow flip chip assembly using temporary adhesive bonding," in *2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference*, 2018.
-

- [29] S. Raghavan, I. Schmadlak, and S. K. Sitaraman, "Interlayer dielectric cracking in back end of line (beol) stack," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1467–1474, 2012.
  - [30] D. Danovitch and J. Sylvestre, "Temporary structure to reduce stress and warpage in a flip chip organic package," May 2009. US 7538432 B1.
  - [31] D. Danovitch and J. Sylvestre, "Temporary structure to reduce stress and warpage in a flip chip organic package," January 2009. US 7473618 B1.
  - [32] D.-Y. Shih, B. Dang, P. Gruber, M. Lu, S. Kang, S. Buchwalter, J. Knickerbocker, E. Perfecto, J. Garant, S. Knickerbocker, K. Semkow, B. Sundlof, J. Busby, R. Weisman, K. Ruhmer, and E. Hughlett, "C4np for pb-free solder wafer bumping and 3d fine-pitch applications," in *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP 2008)*, 2008.
  - [33] V. D. Khanna and S. M. Sri-Jayantha, "Impact of organic substrate warp on c4 non-wets," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 1, no. 12, pp. 1947–1956, 2011. Cited By :3.
  - [34] Y. Li, R. Panat, B. Li, R. Mulligan, P. K. Muthur Srinath, and A. Raman, "The application of two-dimensional x-ray hot stage in flip chip package failure analysis," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 11, no. 1, pp. 141–147, 2011. Cited By :1.
  - [35] M. . Tsai, H. . Chang, and M. Pecht, "Warpage analysis of flip-chip pbga packages subject to thermal loading," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 9, no. 3, pp. 419–424, 2009.
  - [36] J. Sylvestre, M. Samson, D. Langlois-Demers, and E. Duchesne, "Modeling the flip-chip wetting process," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 2004–2017, 2014.
  - [37] D. Danovitch, P. Blais, and E. Cyr, "Extraneous 'microball' formations encountered in leading edge, high pb flip chip on organic packaging applications," *Proc. 40th Int. Symp. Microelectron. (IMAPS)*, 2007.
  - [38] S. Cho, T. . Chang, J. Y. Lee, H. Park, Y. Ko, and G. Park, "New dummy design and stiffener on warpage reduction in ball grid array printed circuit board," *Microelectronics Reliability*, vol. 50, no. 2, pp. 242–250, 2010.
  - [39] R. Huemoeller, S. Rusli, and D. Hiner, "Substrate having stiffener fabrication method," 2008. US Patent App. 11/903,002.
  - [40] K. Moon, Y. Li, J. Xu, and C. P. Wong, "Lead-free interconnect technique by using variable frequency microwave," *Journal of Electronic Materials*, vol. 34, no. 7, pp. 1081–1088, 2005.
  - [41] W. Liu, Y. Tian, L. Yang, C. Wang, and L. Sun, "Oxidation and au-sn reaction of laser reflowed micro-solder joints protected by n2 or exposed to air atmosphere," *Soldering and Surface Mount Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 191–196, 2012.
  - [42] M. Nowottnick, W. Scheel, U. Pape, R. Diehm, J. Wiese, W. Kempe, M. Mallah, M. Suppa, and P. Fink, "A simultaneous and selective microwave supported soldering technology," tech. rep., German Department for Education and Research, 2006.
-

- 
- [43] Y. Jung, D. Ryu, M. gim, C. Kim, Y. Song, J. Kim, J. Yoon, and C. Lee, "Development of next generation flip chip interconnection technology using homogenized laser-assisted bonding," in *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference*, 2016.
  - [44] S. Xu, A. H. Habib, A. D. Pickel, and M. E. McHenry, "Magnetic nanoparticle-based solder composites for electronic packaging applications," *Progress in Materials Science*, vol. 67, pp. 95–160, 2015. Cited By :10.
  - [45] M. Cheng, H. Lin, C. Chen, W. Chen, C. Lee, and C. Liu, "Warpage control in the packaging of integrated circuits," January 2014. US Patent App. 13/559,318.
  - [46] V. S. Rao, S. C. Chong, C. Zhao, J. L. Aw, E. W. Leong Ching, H. Gilho, and D. M. Fernandez, "Development of bonding process for high density fine pitch micro bump interconnections with wafer level underfill for 3d applications," in *Proceedings of the 2013 IEEE 15th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2013*, pp. 543–548, 2013. Cited By :4.
  - [47] K. Sakuma, K. Smith, K. Tunga, E. Perfecto, T. Wassick, F. Pompeo, and J. . Nah, "Differential heating/cooling chip joining method to prevent chip package interaction issue in large die with ultra low-k technology," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 430–435, 2012. Cited By :7.
  - [48] Y. Martin, J. W. Nah, S. Kamalapurkar, S. Engelmann, and T. Barwicz, "Toward high-yield 3d self-alignment of flip-chip assemblies via solder surface tension," in *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 588–594, May 2016.
  - [49] M. Rayasam, T. B. Thompson, G. Subbarayan, C. Gurumurthy, and J. R. Wilcox, "A model for assessing the shape of solder joints in the presence of pcb and package warpage," *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, vol. 128, no. 3, pp. 184–191, 2006.
  - [50] W. Lin, S. Wen, A. Yoshida, and J. Shin, "Evaluation of raw substrate variation from different suppliers and processes and their impact on package warpage," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1406–1411, 2012.
  - [51] W. Lin and J. Na, "A novel method for strip level warpage simulation of pop package during assembly," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 84–90, 2010.
  - [52] P. Hutapea and J. L. Grenestedt, "Reducing warpage of printed circuit boards by using wavy traces," *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, vol. 126, no. 3, pp. 282–287, 2004.
  - [53] V. Jadhav, "Flip chip assembly challenges using high density, thin core carriers," in *Proceedings Electronic Components and Technology, ECTC'05*, 2005.
  - [54] Wikipedia, "Microwave oven." [https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave\\_oven](https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_oven), 1945. Accédé le 8 aout 2016.
  - [55] K. Tamura, K. Nakada, N. Taneichi, P. Andry, J. Knickerbocker, and C. Rosenthal, "Novel adhesive development for cmos-compatible thin wafer handling," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1239–1244, 2010. Cited By :25.
-



- [56] K. Zoschke, T. Fischer, M. Töpper, T. Fritzsche, O. Ehrmann, T. Itabashi, M. P. Zussman, M. Souter, H. Oppermann, and K. . Lang, "Polyimide based temporary wafer bonding technology for high temperature compliant tsv backside processing and thin device handling," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1054–1061, 2012. Cited By :15.
  - [57] J. Charbonnier, S. Cheramy, D. Henry, A. Astier, J. Brun, N. Sillon, A. Jouve, S. Fowler, M. Privett, R. Puligadda, J. Burggraf, and S. Pargfrieder, "Integration of a temporary carrier in a tsv process flow," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 865–871, 2009. Cited By :24.
  - [58] C. Le Coz, "Packaging plastique," *Électronique - Automatique | Électronique*, 2009.
  - [59] G. Poupon, "Procédés de packaging et d'interconnexion de composants électroniques," *Électronique - photonique | Électronique*, 2016.
  - [60] A. Jourdain, A. Phommahaxay, G. Verbinen, G. Murdoch, A. Miller, K. Rebibis, A. Guerrero, J. McCutcheon, M. Privett, J. Neidrich, G. Beyer, and E. Beyne, "Integration and manufacturing aspects of moving from waferbond ht-10.10 to zonebond material in temporary wafer bonding and debonding for 3d applications," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 113–117, 2013. Cited By :8.
  - [61] P. Cognard, "Collage des matériaux - mécanismes. classification des colles," *Mécanique | Travailldes matériaux - Assemblage*, 2002.
  - [62] J.-C. Dubois and G. Rabilloud, "Polymères hétérocycliques thermostables," *Électronique - Automatique | Électronique*, 1995.
  - [63] R. Klein, *Laser Welding of Plastics*, pp. 3–25. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.
  - [64] HD Microsystems, "Hd 3007," 05 2009. <http://snf.stanford.edu/pipermail/specmat/attachments/20100728/da91f684/attachment.pdf>.
  - [65] T. . Tsai, C. . Lin, C. . Lee, S. . Yang, and K. . Chen, "An ultra-fast temporary bonding and release process based on thin photolysis polymer in 3d integration," in *2015 International 3D Systems Integration Conference, 3DIC 2015*, pp. TS8.8.1–TS8.8.5, 2015. Cited By :4.
  - [66] Brewer Science, Inc., "BrewerBond\_BB220," 03 2017. [http://www.brewerscience.com/wp-content/uploads/2016/06/BrewerBOND\\_220.pdf](http://www.brewerscience.com/wp-content/uploads/2016/06/BrewerBOND_220.pdf).
  - [67] Brewer Science, Inc., "BrewerBond\_BB305," 03 2017. [http://www.brewerscience.com/wp-content/uploads/2016/05/BrewerBOND\\_305-2.pdf](http://www.brewerscience.com/wp-content/uploads/2016/05/BrewerBOND_305-2.pdf).
  - [68] J. Hermanowski, "Thin wafer handling - study of temporary wafer bonding materials and processes," in *2009 IEEE International Conference on 3D System Integration, 3DIC 2009*, 2009. Cited By :39.
  - [69] J. Hermanowski, "Thin wafer handling - study of temporary wafer bonding materials and processes," in *2009 IEEE International Conference on 3D System Integration, 3DIC 2009*, 2009. Cited By :39.
-

- 
- [70] W. J. O'donnel, "Effective elastic constants for the bending of thin perforated plates with triangular and square penetration patterns," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 1973.
  - [71] W. T. Chen and C. W. Nelson, "Thermal stress in bonded joints," tech. rep., IBM System Products Division laboratory, March 1979.
  - [72] A. Hunger, G. Carl, A. Gebhardt, and C. Rüssel, "Ultra-high thermal expansion glass-ceramics in the system mgo/al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>/tio<sub>2</sub>/zro<sub>2</sub>/sio<sub>2</sub> by volume crystallization of cristobalite," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 354, no. 52-54, pp. 5402–5407, 2008. Cited By :45.
  - [73] G. Sharma, S. K. Arya, and K. Singh, "Optical and thermal properties of glasses and glass-ceramics derived from agricultural wastes," *Ceramics International*, vol. 44, no. 1, pp. 947–952, 2018.
  - [74] Schott, "Technical glasses - physical and technical properties." Brochure, 2015.
  - [75] G. A. Luurtsema, "Spin coating for rectangular substrates," Master's thesis, University of California, Berkeley, July 1997.
  - [76] "Photolithography." Presentation. Accédé le : 11/09/2018.
  - [77] "The correct material for infrared (ir) applications." <https://www.edmundoptics.fr/resources/application-notes/optics/the-correct-material-for-infrared-applications/>. Accédé le : 13/10/2018.
  - [78] ASTM International, "Standard Practice for Preparation of Bar and Rod Specimens for Adhesion Tests," standard, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, US, 2000.
  - [79] ASTM International, "Standard Practice for Preparation of Bar and Rod Specimens for Adhesion Tests," standard, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, US, 2008.
  - [80] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2 : An Introduction to Microstructures, Processing and Design : Second Edition*, pp. 1–381. Engineering Materials 2 : An Introduction to Microstructures, Processing and Design : Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2013. Cited By :206.
  - [81] S. . Lee, F. . Tai, C. . Wei, and J. . Yu, "Atr-ftir and nanoindentation measurements of pmda-oda polyimide film under different curing temperature," *Materials Transactions*, vol. 48, no. 6, pp. 1554–1557, 2007. Cited By :10.
  - [82] J. Sylvestre, "Integrated modeling of c4 interconnects," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1084–1090, 2007. Cited By :7.
  - [83] P. M. Square, M. K. Toure, S. Allard, B. Borzou, J. Sylvestre, B. Foisy, E. Duchesne, and J. Sylvestre, "High precision numerical and experimental thermal studies of microelectronic packages in still air chamber tests," in *2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference, ESTC 2018 - Proceedings*, 2018.
-